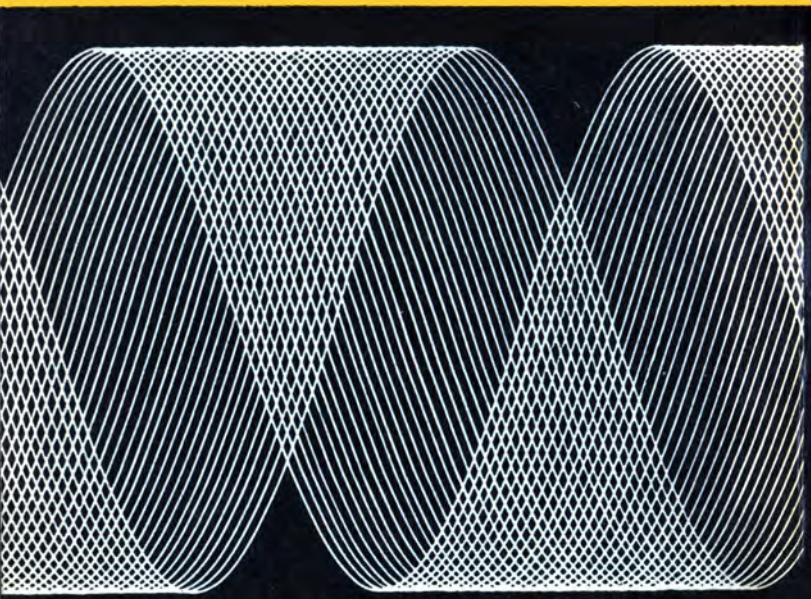
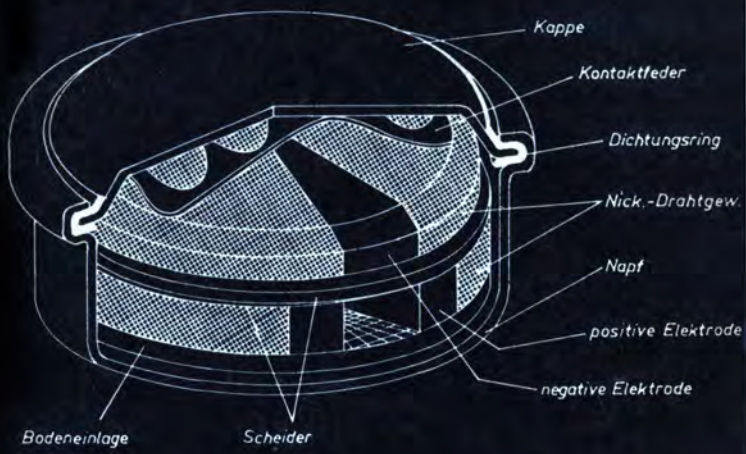
amateurreihe

electronica





Günter Miel

Elektronik des Modellantriebs Teil 2

174

LEER

SCAN BY BLACKBURNER 2013

electronica Band 174

Dr. GÜNTER MIEL

Elektronik des Modellantriebs

Teil 2: Auslegung und Betrieb der Antriebsspannungsquellen

MILITÄRVERLAG
DER DEUTSCHEN DEMOKRATISCHEN
REPUBLIK

1. Auflage, 1979, 1.—20. Tausend
© Militärverlag
der Deutschen Demokratischen Republik (VEB) — Berlin, 1979
Cheflektorat Militärliteratur
Lizenz-Nr. 5 · LSV: 3539
Lektor: Dipl.-Phys. Hans-Joachim Mönig
Zeichnungen: Hans-Georg Hauptvogel
Typografie: Helmut Herrmann · Hersteller: Michael Haase
Vorauskorrektor: Ingeborg Kern · Korrektor: Ursula Kapke
Printed in the German Democratić Republik
Gesamtherstellung: Druckerei Märkische Volksstimme Potsdam
Redaktionsschluß: 15. Februar 1979
Bestellnummer: 746 128 5
DDR 1,90 M

Inhaltsverzeichnis

1.	**Einleitung**	5
2.	**Primärelemente**	17
2.1.	Allgemeines	17
2.2.	Kohle-Zink-Element	20
2.3.	Alkali-Mangan-Element	28
2.4.	Lithium-Element	31
2.5.	Anwendungstechnische Hinweise	33
3.	**Blei-Akkumulatoren**	36
3.1.	Allgemeines	36
3.2.	Offene Blei-Akkumulatoren	37
3.2.1.	Funktion und Aufbau	37
3.2.2.	Pflege und Wartung	40
3.2.3.	Laden	42
3.2.4.	Entladen	44
3.2.5.	Anwendungstechnische Hinweise	49
3.3.	Wartungsfreie Blei-Akkumulatoren	51
3.3.1.	Funktion und Aufbau	51
3.3.2.	Pflege und Wartung	53
3.3.3.	Laden	54
3.3.4.	Entladen	57
3.3.5.	Anwendungstechnische Hinweise	60
4.	**Nickel-Kadmium-Akkumulatoren**	62
4.1.	Allgemeines	62
4.2.	Offene Nickel-Kadmium-Akkumulatoren	63
4.2.1.	Funktion und Aufbau	63
4.2.2.	Pflege und Wartung	65
4.2.3.	Laden	68
4.2.4.	Entladen	70
4.2.5.	Anwendungstechnische Hinweise	74
4.3.	Gasdichte Nickel-Kadmium-Akkumulatoren	75
4.3.1.	Funktion und Aufbau	75
4.3.2.	Pflege und Wartung	79

4.3.3. Laden 79
4.3.4. Entladen 84
4.3.5. Anwendungstechnische Hinweise 92

5. Silber-Zink-Akkumulatoren 97
5.1. Allgemeines 97
5.2. Funktion und Aufbau 99
5.3. Pflege und Wartung 100
5.4. Laden 101
5.5. Entladen 106
5.6. Anwendungstechnische Hinweise 109

6. Literatur- und Quellenverzeichnis 112

1. Einleitung

Die für den Antrieb des Modells erforderliche Energie muß, im Modell in geeigneter Form und Menge gespeichert, mitgeführt werden. Beim Elektroantrieb kommt heute nur die chemische Speicherung in Betracht. Die chemische Energie wird in elektrische Energie und diese in mechanische Energie umgewandelt. Die Umwandlung von elektrischer in mechanische Energie im Elektromotor war Gegenstand von Band 173 der *electronica*-Reihe. Im vorliegenden Band werden die Speicherung der elektrischen Energie in Form von chemischer Energie und die Umwandlung beider Energieformen ineinander beschrieben. Zunächst sollen die dabei auftretenden neuen Begriffe geklärt werden.

Die elektrische Energie wird in einem Element in Form von chemischer Energie gespeichert. Das elektrochemische Element besteht aus folgenden Teilen:

- positive Elektrode — Anode (nimmt Elektronen aus dem äußeren Stromkreis auf);
- negative Elektrode — Katode (gibt Elektronen an den äußeren Stromkreis ab);
- Elektrolyt — sauer oder alkalisch (schließt den inneren Stromkreis, indem er den Ionentransport zwischen den Elektroden sicherstellt).

Läßt sich der elektrochemische Vorgang der Entladung eines Elements nicht umkehren, ist er also einmalig, so bezeichnet man es als *Primärelement*. Primärelemente sind damit nach der Entladung wertlos und können nicht wieder verwendet werden. Dabei gibt es jedoch gewisse Ausnahmen, auf die im *electronica*-Heft 175, Teil 3, eingegangen wird. Ist die chemische Reaktion in einem Element umkehrbar, kann es also geladen und erneut entladen werden, dann bezeichnet man es als *Sekundärelement*, *Akkumulator* oder *Sammler*. Die technische Ausführung des Primär- oder Sekundärelements in einem Gefäß, versehen mit Verschluß und elektrischen Anschlüssen, den *Polen*, ist eine *Zelle*. Man unterscheidet gasdichte (auslaufsicher, wartungsfrei, beliebige Einbaulage) und offene (regelmäßige Wartung erforderlich, Einbau-

lage vorgeschrieben) Zellen. Die Zusammenschaltung und Montage mehrerer Zellen bezeichnet man als *Batterie*.
Für die Anwendung bei bestimmten Antriebslösungen ist neben dem Kostenfaktor die Belastbarkeit eines Elements entscheidend. Dieser Begriff an sich ist jedoch für die Charakterisierung eines Elements noch zu allgemein. Wichtig sind hinsichtlich der Belastbarkeit folgende Aussagen:

- **Wie groß ist der Entladestrom?**
- **Handelt es sich um eine kurzzeitige (einige Sekunden bis Minuten) oder dauernde Entladung?**
- **Wie ist die Spannungslage während der Entladung?**
- **Wie ändert sich die entnehmbare Kapazität mit dem Entladestrom?**
- **Welchen Einfluß hat die Temperatur auf Entladestrom, Spannungslage und entnehmbare Kapazität?**

Das Verhalten dieser Parameter ist je nach Elementart und -typ recht unterschiedlich. Da sie für den Modellantrieb von entscheidender Bedeutung sind, seien im folgenden einige wesentliche Zusammenhänge näher betrachtet.
Da jedes Element je nach Art und Typ einen unterschiedlich großen Innenwiderstand hat, tritt bei Belastung an ihm ein Spannungsabfall als Verlustgröße (Wärmeentwicklung in der Zelle) auf. Der innere Spannungsabfall ist nach

$$U_i = I_E^2 \, R_i \,, \tag{1}$$

mit U_i — innerer Spannungsabfall, I_E — Entladestrom, R_i — innerer Widerstand, und damit auch der Verlust nach

$$P_{vi} = I_E^2 \, R_i \,, \tag{2}$$

mit P_{vi} — innerer Verlust, um so größer, je größer der Entladestrom I_E ist. Daraus geht aber auch hervor, daß die entnehmbare Energie von der Belastung abhängt. Wegen der inneren Verluste wird sie bei großen Entladeströmen kleiner sein als bei kleinen Entladeströmen. Ein Maß, mit dem sich dieser Zusammenhang beschreiben läßt, ist die *Kapazität* (die in der Zelle gespeicherte Ladungsmenge). Man bezieht die *Nennkapazität* einer Zelle auf einen bestimmten Entladestrom und auf eine bestimmte Entladezeit. Die Entladung einer Zelle gilt als beendet, wenn die Klem-

menspannung auf den Wert der *Entladeschlußspannung* gesunken ist. Je nach Elementart gibt es unterschiedliche Werte der Entladeschlußspannung. Für die Entladung rechnet man mit der mittleren Entladespannung und erhält aus

$$W = U_z K\,, \tag{3}$$

$$K = I_E t \tag{4}$$

und

$$W = U_z I_E t\,, \tag{5}$$

mit W — gespeicherte Energie, U_z — mittlere Entladespannung der Zelle, K — Kapazität, I_E — Entladestrom, t — Entladezeit, auch die in der Zelle gespeicherte Energie. Der Kapazitätswert dient hauptsächlich zur Charakterisierung der Sekundärelemente, da diese eine flache Spannungslage haben. Die Nennkapazität wird nach IEC-Empfehlung einheitlich angegeben.

Für Blei-Akkumulatoren ist die Nennkapazität auf die 20stündige Entladung mit konstantem Strom bezogen. Den Nennentladestrom erhält man dann zu

$$I_E = \frac{1}{20} \cdot K_{20} = 0{,}05 \cdot K_{20}, \tag{6}$$

mit I_E in A (Ampere), K_{20} in A · h.

In älterer Literatur wird dieser Nennentladestrom auch als I_{20} bezeichnet. Analog dazu sind für Nickel-Kadmium-Akkumulatoren die Nennkapazität K_5 und für Silber-Zink-Akkumulatoren die Nennkapazität K_5 oder K_1 definiert. Ist der Entladestrom größer als der Nennentladestrom, so wird auf Grund der vorangegangenen Erläuterungen die Kapazität $K < 100\,\%$ der Nennkapazität (innere Verluste!). Ist der Entladestrom kleiner als der Nennentladestrom, dann kann die dem Akkumulator entnommene Kapazität $K > 100\,\%$ der Nennkapazität sein. Den durch Gl. (6) beschriebenen Zusammenhang, der den Entladestrom als Mehrfaches oder Teil der Nennkapazität ausweist, bezeichnet man als *Entladerate*.

Analog dazu bezieht man den Ladestrom (Nennladestrom) auf die Nennkapazität K_{20}, K_5 oder K_1 und definiert damit die *Laderate*. Die Laderate charakterisiert die verschiedenen *Lademethoden*. Man unterscheidet:

— *Erhaltungsladen*
Mit Erhaltungsladen werden die durch Selbstentladung entstehenden Kapazitätsverluste ausgeglichen;

$$I_L = (0{,}0004 \ldots 0{,}003) \cdot K_{20}\,(K_5)\,. \tag{7}$$

— *Dauerladen*
Mit dem Dauerladen werden Verluste durch Selbstentladung und der kurzzeitige Verbrauch durch Lastzuschaltung (Netzspitzen, Netzausfall, Notbeleuchtung u. a.) gedeckt;

$$I_L = (0{,}003 \ldots 0{,}005) \cdot K_{20}\,(K_5)\,. \tag{8}$$

— *Normalladen*
Bei Normalladen wird mit dem Nennladestrom geladen;

$$I_L = 0{,}1 \cdot K_{20}\,(K_5)\,. \tag{9}$$

— *Ausgleichsladen*
Die Ladeart dient zum Ausgleich entstandener Kapazitätsunterschiede der Zellen in einer Batterie. Es wird die doppelte Zeit mit Nennladestrom geladen;

$$I_L = 0{,}1 \cdot K_{20}\,(K_5)\,.$$

— *Beschleunigtes Laden*
Ladezeit: 3 bis 5 Stunden;

$$I_L = (0{,}2 \ldots 0{,}5) \cdot K_5 \tag{10}$$

— *Schnelladen*
Ladezeit: 20 bis 60 Minuten;

$$I_L = (1 \ldots 3) \cdot K_5\,. \tag{11}$$

— *Ultraschnelladen*

$$I_L = (3 \ldots 60) \cdot K_5\,. \tag{12}$$

Welche Lademethode man bei welchem Akkumulator anwenden kann, wird an entsprechender Stelle geklärt.
Neben diesen Lademethoden unterscheidet man nach dem zeitlichen Verhalten von Strom und Spannung während des Ladens die folgenden *Ladearten*:

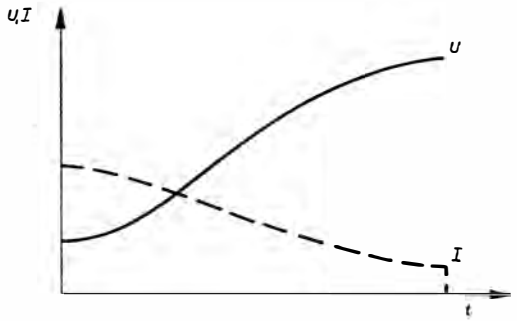


Bild 1.1 W-Kennlinie

— *W-Laden*
Während des Ladevorgangs sinkt der Ladestrom mit steigender Klemmenspannung und wird nach Volladung abgeschaltet (Bild 1.1).

— *I_{konst}-Laden*
Bis zur Volladung wird mit konstantem Strom geladen (Bild 1.2).

— *U_{konst}-Laden*
Bis zur Volladung wird mit konstanter Ladespannung bei fallendem Strom oder mit Strombegrenzung geladen (Bild 1.3).

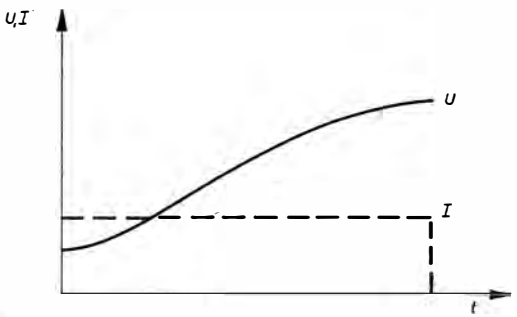


Bild 1.2 Konstantstromladen

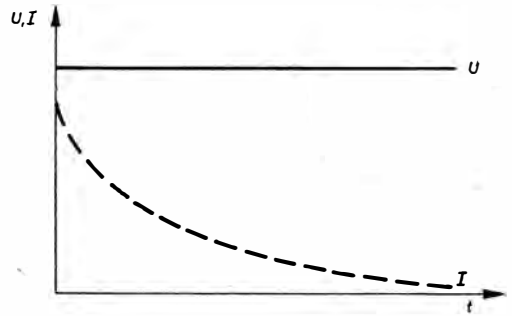


Bild 1.3 Konstantspannungsladen

— *UI-Laden*
Dabei handelt es sich um eine Kombination von I_{konst}-Laden und U_{konst}-Laden. Bis zum Erreichen einer bestimmten Klemmenspannung wird mit konstantem Strom geladen. Dann bleibt die Klemmenspannung konstant, und es wird mit fallendem Strom weitergeladen (Bild 1.4).

— *U_{begr}-Laden*
Die Klemmenspannung ist in der Höhe begrenzt, meist die Ladeschlußspannung. Wird der Wert überschritten, so schaltet das Ladegerät ab (Bild 1.1 oder Bild 1.2).

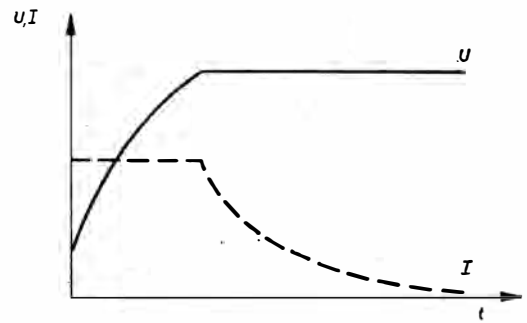


Bild 1.4 UI-Kennlinie

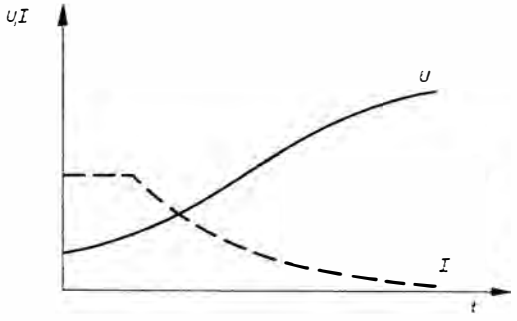


Bild 1.5 Laden mit Strombegrenzung

— *I_{begr}-Laden*
Der maximal zulässige Ladestrom ist begrenzt; während des Ladens kann er niedriger sein (Bild 1.5).

— *$I_{umschalten}$-Laden*
Der maximale Ladestrom wird als Konstantstrom (Bild 1.6) oder mit Vorwiderstand (Bild 1.7) eingestellt und nach Erreichen eines bestimmten Spannungswerts (Gasungsspannung) auf einen niedrigeren Wert umgeschaltet.

Jede dieser Ladearten ist zeitbegrenzt, d. h., nach erreichter Volladung wird durch einen Zeitschalter bzw. nach Ablauf der Zeit auch von Hand oder durch einen Spannungs- oder Temperatur-

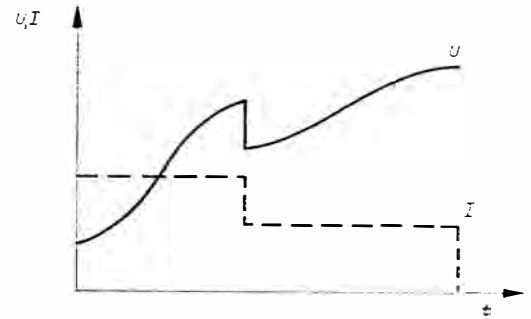


Bild 1.6 Laden mit Stromumschaltung (Konstantstrom)

diskriminator abgeschaltet. In der Praxis können Ladearten auch kombiniert werden (I_{konst}-Laden oder W-Laden mit Spannungsbegrenzung). Die technische Realisierung von Ladeart und Lademethode im Ladegerät bedingt dann das Ladeverfahren für den jeweiligen Akkumulator.

In einen Akkumulator muß wegen der beim Laden entstehenden Verluste immer eine größere Kapazitätsmenge eingeladen werden, als dann als Nennkapazität entnehmbar ist. Das Verhältnis

$$\eta_{Ah} = \frac{K_{20}}{K_{Laden}} \tag{13}$$

(analog für K_5 und für K_1) bezeichnet man als *Ah-Wirkungsgrad* und den Kehrwert als *Ladefaktor*. Ladefaktoren für die verwendeten Akkumulatoren sind aus Tabelle 1.1. zu ersehen. Das bedeutet z. B. für den Blei-Akkumulator, daß er 11 Stunden mit $I_L = 0{,}1 \cdot K_{20}$ geladen werden muß. In der Praxis liegen die Werte sicher etwas darüber.

Ein wichtiger Kennwert der elektrochemischen Elemente ist die *Lebensdauer*. Bei Primärelementen tritt auch bei Nichtbenutzung durch Selbstentladung Kapazitätsverlust ein. Die maximale Lebensdauer entspricht dann der Lagerfähigkeit, die wesentlich von der Temperatur beeinflußt wird.

Bei Akkumulatoren bestimmen vor allem 2 Parameter die Lebensdauer. Einmal handelt es sich um den elektrochemischen Verschleiß bei Nichtbenutzung. Selbst bei Nichtbenutzung und Einhaltung der Wartungsvorschriften hat jeder Akkumulator eine begrenzte Lebensdauer. Die Lebensdauer wird zum anderen

Tabelle 1.1. Ladefaktoren der Akkumulatoren

Akkumulator	Ladefaktor
Blei	1,1
Nickel-Kadmium (Massezelle)	1,4
Nickel-Kadmium (Sinterzelle)	1.2
Silber-Zink	1,0 ... 1,05

auch von der Anzahl der Lade-Entlade-Zyklen bestimmt. Speziell für häufiges Laden und Entladen konstruierte Akkumulatoren sind zyklenfeste Typen. Daneben gibt es Akkumulatoren für Dauerbetrieb (Dauerladen), die dann aber durch eine wesentlich geringere Zyklenanzahl gekennzeichnet sind. Die Lebensdauergrenze ist erreicht, wenn die nutzbare Kapazität auf 80% der Nennkapazität K_{20} (bzw. K_5, K_1) abgesunken ist. Bei Akkumulatoren werden für die Lebensdauer daher meist die Zeit und die mögliche Zyklenanzahl angegeben.

Es sei noch darauf hingewiesen, daß die Lebensdauer der Akkumulatoren von der Einhaltung der Wartungsvorschriften und den Umgebungsbedingungen (Temperatur, Luftfeuchte, aggressive Dämpfe oder Flüssigkeiten, Erschütterungen u. a.) abhängt. Für den Anwender elektrochemischer Spannungsquellen ist ferner wichtig, daß fast alle Kennwerte, z. B. Kapazität, Strom, Selbstentladung, sehr stark von der Betriebstemperatur beeinflußt werden.

Abschließend zu diesem Abschnitt seien noch einige anwendungstechnische Hinweise gegeben, die für alle Elemente gelten. Beim Umgang mit offenen Zellen ist besondere Vorsicht geboten, da die Elektrolyte stark ätzen. **Arbeitsschutzbestimmungen beachten!** Bei Arbeiten an offenen Akkumulatoren sind Schutzbrille und Gummihandschuhe zu tragen. Mit Säure benetzte Handflächen müssen sofort gründlich mit Seife gewaschen und mit reichlich Wasser abgespült werden. Mit Kalilauge benetzte Handflächen sind sofort mit verdünnter Essigsäure (1:6) abzuwaschen. Augenverletzungen müssen umgehend mit 3%iger Borsäure behandelt werden, in jedem Fall ist danach ein Facharzt aufzusuchen. Elektrolyte darf man auf keinen Fall mit dem Mund ansaugen! Offene Akkumulatoren mit sauren und alkalischen Elektrolyten sollten möglichst nicht im selben Raum geladen werden. Läßt sich das nicht vermeiden, dann muß man dafür sorgen, daß nicht die Elektrolytnebel der einen Bauart über die andere Bauart hinwegstreichen. Die Räume, in denen geladen wird, müssen gut belüftet sein. Sie dürfen nicht mit brennender Zigarette oder offenem Feuer betreten werden. Werkzeuge und andere metallische Gegenstände nicht auf die Zellen legen; es besteht Kurzschluß- und Brandgefahr! Im eigenen Interesse lege man vor dem Arbeiten an Akkumulatoren Ringe, Ketten, Armbänder, Uhren u. ä. ab. Kurzschlüsse durch Metallschmuckstücke beschädigen

diese nicht nur, sondern verursachen auch schmerzhafte und schlecht heilende Brandwunden.

Beim Laden eines Akkumulators wird der Pluspol der Zelle oder der Batterie mit dem Pluspol des Ladegeräts und der Minuspol mit dem Minuspol des Ladegeräts verbunden. Es darf nur mit Gleichstrom der für den Akkumulator entsprechenden Stärke geladen werden. Aus Gründen der Arbeitssicherheit und um den erforderlichen Berührungsschutz zu gewährleisten, sollte die Klemmenspannung des Ladegeräts immer, auch im Leerlauf, unter 42 V liegen. Näheres zur Auslegung von Ladegeräten findet der Leser im Band 3.

Durch den Spannungsabfall am Innenwiderstand entsteht in der Zelle Wärme. Bei hochbelastbaren Typen (Silber-Zink-, Sinterzellen) begrenzt diese Verlustwärme sogar die Belastbarkeit der Zellen. Da man bei Hochleistungsantrieben unter Umständen an die Grenze der Belastbarkeit kommt, muß auf ausreichende Kühlung der Zellen geachtet werden, denn sonst sind bleibende Schäden (Kapazitätsverlust, eventuell Totalausfall) unvermeidlich. Bei Elektroflugmodellen leitet man den Kühlluftstrom durch entsprechende Ein- und Austrittsöffnungen nicht nur zum Motor, sondern auch zur Batterie. Ähnlich sollte man bei Schiffsmodellen verfahren. Das Problem dabei besteht in dem geringen Propellerluftstrom bzw. im nur mäßigen Fahrtwind. Ferner muß man beim Schiffsmodell das Eindringen von Wasser verhindern. Auf keinen Fall darf eine hochbelastbare Batterie rundum eingepackt sein. Die Luft im Modell sollte frei zirkulieren und dabei frei an die Seitenflächen der Batterie gelangen können. Sehr bewährt hat sich ähnlich wie beim Fahrtregler eine schachtförmige Öffnung über dem Antriebsakkumulator, durch die die erwärmte Luft abziehen kann. Die Anschlüsse der Antriebsbatterien müssen gut zugänglich, die Kontaktflächen sauber und die Befestigungsschrauben fest angezogen sein. Unsaubere Kontakte und lockere Schrauben führen zu erhöhten elektrischen Verlusten und infolgedessen zu einem merkbaren Leistungsabfall des Antriebs.

Besondere Probleme wirft die Zusammenschaltung von Einzelzellen zu Batterien auf. Grundsätzlich soll man nur Zellen gleichen Typs, gleicher Nennkapazität und mit gleichem Herstellungsdatum zu Batterien zusammenschalten. Das gilt für Primär- und Sekundärzellen gleichermaßen, Reihenschaltungen von

Zellen nimmt man vor, um die für den Antrieb erforderliche Betriebsspannung zu erhalten:

$$U_B = nU_Z, \tag{14}$$

mit U_B — Klemmenspannung der Batterie, n — Anzahl der Zellen, U_Z — Klemmenspannung der Zelle.

Bei der Reihenschaltung von Primärzellen ist deren Anzahl praktisch nicht begrenzt. Bei Sekundärzellen sollten dagegen nicht mehr als 10 Zellen in Reihe geschaltet sein. Bei einer Reihenschaltung von mehr als 10 Zellen sind Maßnahmen zu treffen, damit man abgefallene Zellen (in der Kapazität abweichend) rechtzeitig erkennt und entweder nachlädt oder austauscht. Sonst besteht die Gefahr, daß die abgefallenen Zellen beim Tiefentladen umgepolt und damit (meist sogar irreversibel) geschädigt werden. Auf die spezifischen Bedingungen für Tiefentladung und Entladeschluß wird bei den jeweiligen Akkumulatortypen hingewiesen. Läßt sich die erforderliche Betriebsspannung nicht mit 10 Zellen erreichen, dann sollte man besser 2 oder 3 Batterien mit geringerer Zellenanzahl vorsehen. Das hat meist schon anwendungstechnische Vorteile, da sich mehrere kleine Batterien besser im Modell unterbringen (zum Trimmen ausnutzen!) und auch leichter ein- und ausbauen lassen als eine große.

Steht zum Betrieb des Modells kein ausreichend belastbarer Zellentyp zur Verfügung, so kann man die Belastung der Zellen durch Parallelschaltung verringern. Es sei aber darauf verwiesen, daß die Parallelschaltung von Zellen recht problematisch ist, da bereits bei geringsten Differenzen der Zellenspannung erhebliche Ausgleichsströme fließen, die zu einem Leistungs- bzw. Kapazitätsverlust führen. Daher sollte unbedingt der Zellentyp in der Belastungsfähigkeit (ganz gleich, ob Kurz- oder Langzeitbelastung) dem Motor angepaßt sein. Es ist für Lebensdauer, Kapa-

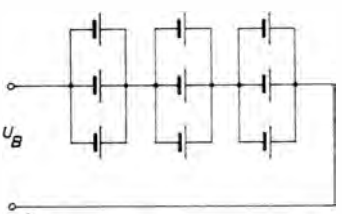


Bild 1.7
Reihenparallelschaltung von Einzelzellen zu einer Batterie

zitätsausnutzung, Betriebszeit und nicht zuletzt auch kostenmäßig günstiger, eine Zelle mit zu großer als zu kleiner Kapazität zu wählen. Läßt sich kein entsprechend belastbarer Zelltypen beschaffen, so ist bei der Parallelschaltung von Primärzellen die Forderung nach Gleichheit der Zellen noch genauer einzuhalten als bei der Reihenschaltung. Bei der Parallelschaltung von Sekundärzellen muß neben den eingangs genannten Bedingungen noch der exakt gleiche Ladezustand gegeben sein. Einmal durch Parallelschaltung zu Batterien zusammengefügte Zellen sollten aus den genannten Gründen nicht wieder getrennt werden. Durch die Parallelschaltung der Zellen verringert sich die Belastung der Einzelzelle um den Faktor $\frac{1}{n}$:

$$I_Z = \frac{1}{n} I_E , \tag{15}$$

mit I_Z — Belastungsstrom der Zelle, n — Anzahl der Zellen, I_E — Entladestrom der Batterie.

Bei der Reihenschaltung zu Batterien werden parallelgeschaltete Zellen dann wie eine Zelle behandelt (Bild 1.7).

2. Primärelemente

2.1. Allgemeines

Beim Primärelement wird die chemische Energie in Form eines Oxydationsmittels (z. B. Braunstein) und eines Reduktionsmittels (z. B. Zink) bereitgestellt. Das Primärelement ist entladen bzw. erschöpft und damit unbrauchbar, wenn einer der beiden Reaktionspartner durch Entladung oder Selbstentladung verbraucht ist.

Das Bestreben der Techniker ging dahin, Elemente zu entwickeln, die einen hohen Energie-Inhalt [W · h/kg] bzw. eine hohe Energiedichte [W · h/cm³] aufweisen. Die dafür möglichen Kombinationen von Oxydations- und Reduktionsmitteln sind sehr vielfältig, werden in der Praxis aber durch folgende Forderungen erheblich eingeschränkt:

- Das aktive Material muß sich ökonomisch günstig herstellen lassen.
- Das Element muß ausreichend belastbar sein durch
  - geringe Polarisation,
  - große Oberfläche des aktiven Materials,
  - guten Ionenleiter als Elektrolyt.
- Das Element muß lagerfähig sein, d. h.
  - keine Elektronenleitung in Elektrolyten,
  - keine Korrosion der Elektroden,
  - beständige Scheider aufweisen.
- Das Element muß in einem weiten Temperaturbereich arbeitsfähig sein.

Diese Aufstellung wird noch durch weitere herstellungs- und anwendungsbedingte Forderungen ergänzt bzw. präzisiert. Von den möglichen und im Laufe der Zeit ausprobierten Elementkonstruktionen haben nur wenige die genannten Forderungen erfüllt und sich in der Praxis bewährt. Dabei muß man noch zwischen Spezialanfertigungen für Militärwesen, Raumfahrt und Sonderzwecke (Rettungsgeräte, Forschung) sowie den handelsüblichen Typen unterscheiden. Für Sonderzwecke kann man heute Elemente mit ganz besonderen Eigenschaften (Belastbarkeit, Lebensdauer,

Energiedichte o. a.) gezielt entwickeln. Die Kosten sind dabei — im Gegensatz zu handelsüblichen Elementen — von zweitrangiger Bedeutung. Handelsüblich bedeutet dabei aber nicht, daß man diese Elemente in jedem Fachgeschäft kaufen kann. Auf die für den Modellantrieb geeigneten Typen und deren spezielle Probleme (auch der Beschaffung) wird in den folgenden Abschnitten eingegangen.

Die Energiedichten der bis zur Produktionsreife entwickelten Primärzellen sind in Bild 2.1 dargestellt. Das heute auch noch am meisten verwendete Primärelement ist wegen der preisgünstigen Herstellung des *Leclanchè*-Element. Doppelte Energiedichte und auch bei anderen Parametern bessere Werte gegenüber dem *Leclanchè*-Element weisen die Alkali-Mangan-Zellen (MnO_2/Zn mit alkalischem Elektrolyten) auf. Die Silber-Oxid-Zink- und die Quecksilber-Oxid-Zellen werden hauptsächlich in Form von Knopfzellen für Hörgeräte, Kameras (Verschlüsse, Lichtmessung), Armbanduhren u. ä. hergestellt. Für Antriebe scheiden diese Systeme aus. Lithium-Zellen sind speziell in einem breiten Typensortiment für Weltraum- und Forschungszwecke entwickelt worden. Näheres dazu im Abschnitt 2.4. Daß in Bild 2.1 nicht für jedes System nur ein bestimmter Wert der Energiedichte angegeben wird, liegt daran, daß neben der aktiven Masse Elektrodengerüst, Elektrolyt, Scheider, Gefäß- und Dichtungsmaterial, Verbinder und Anschlußklemmen in das Volumen bzw. Gewicht

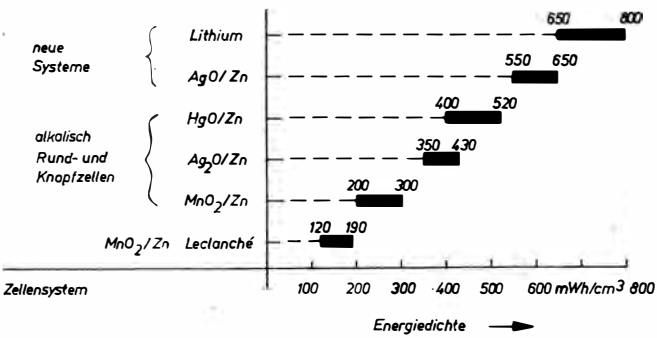


Bild 2.1 Energiedichte von Primärzellen

der Zelle mit eingehen. Kleine Zellentypen haben daher eine geringere Energiedichte als größere.

Neben den in Bild 2.1 erwähnten Primärsystemen gibt es weitere für spezielle Anwendungen, die an dieser Stelle nur der Vollständigkeit halber genannt seien. Die Lagerzeit von Primärelementen ist durch Alterung, Korrosion und Selbstentladung begrenzt. Diese unerwünschten Reaktionen lassen sich vermeiden, wenn die Betriebsbereitschaft der Zellen erst kurz vor dem Einsatz durch Aktivieren hergestellt wird. Man unterscheidet Füllelemente, wärmeaktivierte, gasaktivierte und mechanisch aktivierte Elemente. Bei den Füllelementen wird der Elektrolyt erst bei Bedarf zugefügt, z. B. Seewasser, Leitungswasser oder Schwefelsäure. Füllelemente werden für Notbeleuchtungen, Signalbojen, Markierungen, Nachrichtengeräte, Wettersonden, Seenotgeräte u. a. verwendet. Wärme- und gasaktivierte Elemente haben bisher keine praktische Bedeutung erlangt. Mechanisch aktivierbare Elemente sind eigentlich nur eine Sonderform der Füllelemente, da der Elektrolyt in einer Kapsel in der Zelle vorhanden ist. Zur Aktivierung wird die Kapsel mechanisch zerstört und setzt den Elektrolyten frei.

Abschließend soll noch auf eine Frage eingegangen werden, die am Anfang der Überlegungen zur Konstruktion eines Modellantriebs steht: Wird das Modell mit Primär- oder Sekundärzellen, landläufig gesprochen, mit Trockenbatterien oder Akkumulatoren ausgerüstet? Um es vorwegzunehmen, ganz einfach ist die Beantwortung dieser Frage nicht. Für die richtige Entscheidung sind einige Faktoren in die Überlegung einzubeziehen. Zunächst ist dabei die technische Forderung zu sehen. Soll ein Hochleistungsantrieb (E-Flug, Modellrennboot) betrieben werden, dann kommen nur hochbelastbare Elemente (Sinterzellen, Silber-Zink-Zellen) in Frage. Beim Normalantrieb von Schiffs- und Automodellen spielt der Kostenfaktor eine entscheidende Rolle. Deshalb kann man Automodelle (bis $L_{üa}$= 500 mm) und kleine Schiffsmodelle (bis $L_{üa}$ = 700 mm) durchaus mit Primärzellen ausrüsten. Die Hinweise aus Abschnitt 1. zur Reihen- und Parallelschaltung sind dabei zu beachten.

Wichtig für diese Anwendungsbereiche ist die Nutzungshäufigkeit. Wird das Modell nur selten (einigemal im Sommer) betrieben, dann können z. B. Monozellen wesentlich rentabler sein als ein Blei-Akkumulator. Hinzu kommt, daß der Blei-Akkumulator

auch bei Nichtbenutzung (also auch im Winter, und wer denkt schon daran?) ständig gewartet werden muß. Bei regelmäßiger Wartung kann der Blei-Akkumulator 3 bis 4 Sommer seinen Dienst tun. Ohne Wartung übersteht er 1 Sommer, selten 2. Hier genügt also eine einfache Überschlagsrechnung, welche Spannungsquelle rentabler ist.

Experimentiert man mit einem Antrieb, um günstige Lösungen für Zuladung, Trimm und vorbildgetreue Geschwindigkeit bei Schiffsmodellen zu finden, so kann man bei kleinen Modellen zunächst meist mit den preiswerten Kohle-Zink-Elementen arbeiten. Da der Preis nicht der einzige Faktor ist, läßt sich die eingangs gestellte Frage auch nicht nur von dieser Basis aus beantworten. Oft entscheiden bereits die anwendungstechnischen Bedingungen im Modell über die Art der Spannungsquelle. Welche technischen Faktoren dabei zu bedenken sind, geht aus den folgenden Abschnitten über Primär- und Sekundärelemente hervor.

2.2. Kohle-Zink-Element

Dieses auch heute noch am meisten verwendete Primärelement wurde bereits 1867 von dem französischen Ingenieur *G. Leclanchè* der Öffentlichkeit vorgestellt. Daher kommt auch die Bezeichnung „*Leclanchè*-Element". *P. Schmidt* entwickelte dann um 1900 daraus das Trockenelement, indem er den wäßrigen Elektrolyten mit Weizenmehl eindickte. An dieser Form hat sich bis heute fast nichts verändert. Seit 1939 werden Leak-Proof-Zellen hergestellt. Soviel zur geschichtlichen Entwicklung; man sieht, echte Erfindungen sind auch nach über 100 Jahren noch aktuell.

Das *Leclanchè*- bzw. Kohle-Zink-Element müßte richtig eigentlich Braunstein-Zink-Element heißen, denn die aktive Masse der positiven Elektrode ist Braunstein (MnO_2), der eingepreßte Kohlestift bildet nur den nach außen reichenden Anschluß des Pluspols. Der Zinkbecher stellt die negative Elektrode dar; er ist gleichzeitig das Gefäß der Zelle. Als Elektrolyt wird eingedickte oder in einem Träger (z. B. Papier) festgelegte Salmiaklösung (NH_4Cl) verwendet. Damit die Salmiaklösung bei entladenen Zellen nicht auslaufen kann, muß das Zink im Überschuß vorhanden sein.

Die für Modellantriebe geeigneten Zellen sind als Rundzellen

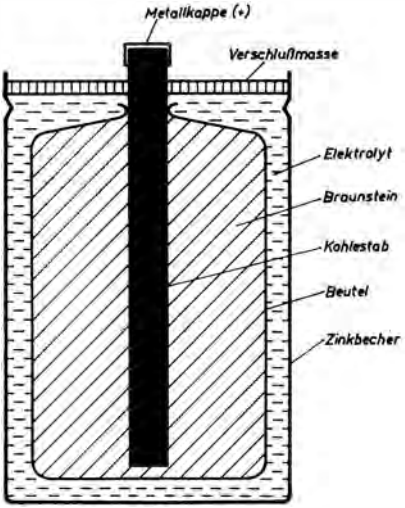


Bild 2.2
Aufbau einer Kohle-Zink-Zelle

gebaut (Bild 2.2). Die Zellenöffnung wird mit Vergußmasse (Paraffin, Bitumen o. ä.) abgeschlossen. Damit die Zellenbecher bei der Anordnung zu Batterien keinen Kurzschluß verursachen, werden sie noch mit einer Papphülle versehen. Diese Papphülle saugt außerdem eventuell ausgetretene Elektrolytflüssigkeit auf.

Bild 2.3 Bauformen (Typen) von Kohle-Zink-Rundzellen (v. l. n. r.) R 6 — Mignonzelle; R 14 — Babyzelle; R 20 — Monozelle; 3 R 12 — Flachbatterie

Handelsüblich sind folgende Bauformen (Bild 2.3): R 6 — Mignonzelle, R 14 — Babyzelle, R 20 — Monozelle und 3 R 12 — Flachbatterie.

Für den Modellantrieb ist der Typ R 20 (Monozelle) von besonderem Interesse, da er je nach Anwendungszweck mit unterschiedlichen Kenndaten hergestellt wird. In der DDR gibt es:

— die Gerätezelle (*TGL 7487 A*) für Dauerbelastung in Radios und technischen Geräten;
— die Zelle für Beleuchtungszwecke (*TGL 7487 B*) für intermittierende Belastung;
— die auslaufsichere Zelle (*TGL 7487 C*) für hohe Belastungen und lange Lagerfähigkeit, angewendet in Blitzlichtgeräten, Kameraantrieben, Warnleuchten u. ä. (Bild 2.4).

Bei der auslaufsicheren Zelle (leak proof) wird ein mit Elektrolyten getränktes Papier als Scheider und Elektrolytträger verwendet. Dadurch erzielt man einen geringen Innenwiderstand (hohe Belastbarkeit) und einen zusätzlichen Kapazitätsgewinn. Damit die Zelle auslaufsicher ist, wird sie mit einem vernickelten Stahlmantel umpreßt. Diese 3 Typen werden auch von anderen Herstellern, dann aber mit anderen Bezeichnungen, produziert. Für den Amateur ist das Verhalten des Kohle-Zink-Elements unter Belastung von Interesse, damit er daraus Rückschlüsse für die Anwendung ziehen kann. Das Betriebsverhalten beschreibt man am besten mit Kennliniendarstellungen. Da bei Belastung einer Zelle eine ganze Reihe von Faktoren Einfluß ausüben, so z. B.

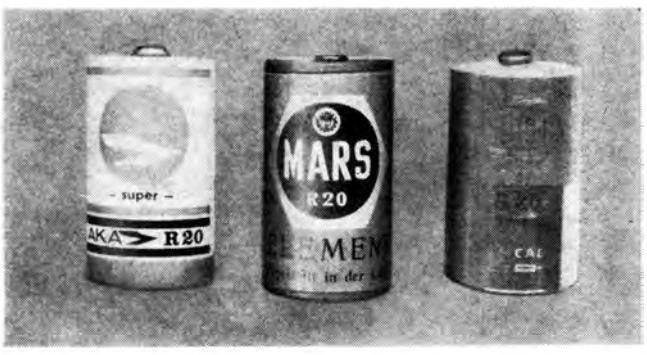


Bild 2.4 Monozellen R 20 (v. l. n. r.): Gerätezelle; Zelle für Beleuchtungszwecke; auslaufsichere Zelle

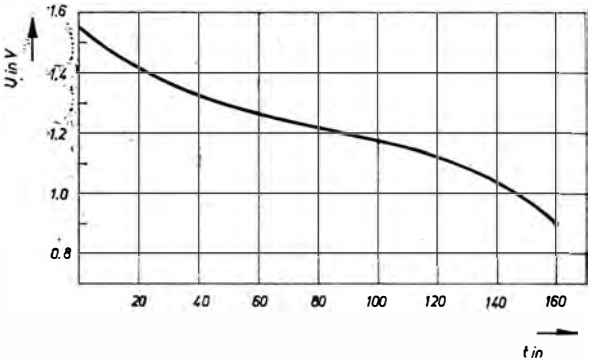


Bild 2.5 Entladekennlinie einer Gerätezelle R 20

der Belastungswiderstand bzw. der Entladestrom, der Ladezustand und die Betriebstemperatur, die sich dazu noch gegenseitig beeinflussen, sind mehrere Kennliniendarstellungen erforderlich. Die Entladekurve eines Kohle-Zink-Elements ist in Bild 2.5 dargestellt. Aus dem Kennlinienverlauf erkennt man, daß sich die Klemmenspannung der belasteten Zelle stark mit der Entladezeit ändert. Das Kohle-Zink-Element hat im Vergleich zu anderen elektrochemischen Spannungsquellen eine schlechte Spannungslage. Die Klemmenspannung der unbelasteten frischen Zelle liegt bei $U_Z = (1{,}55 \ldots 1{,}75)$ V, die der entladenen oder überlagerten Zelle bei $U_Z = 1{,}5$ V. Bei Belastung sinkt die Klemmenspannung auf Werte von $U_Z = (1{,}3 \ldots 1{,}6)$ V.

Als Entladeschlußspannung kann man bei Zellen für Antriebe oder Beleuchtungszwecke die halbe Klemmenspannung der frischen Zelle, also $U_{ZS} = 0{,}75$ V, annehmen. Der Antrieb hat zwar mit der halben Klemmenspannung bei weitem nicht mehr die Nennleistung, er ist dann aber noch betriebsfähig. Die mit Erreichen der halben Klemmenspannung noch in der Zelle verfügbare Kapazität ist außerdem sehr gering. Bei anderen Anwendungen, z. B. elektronischen Geräten u. ä., die unterhalb einer bestimmten Minimalspannung (das können bereits $U_Z = 1{,}25$ V oder auch $U_Z = 1{,}1$ V oder $U_Z = 0{,}9$ V sein) nicht mehr funktionsfähig sind, muß die Entladeschlußspannung entsprechend heraufgesetzt werden. Der starke Spannungsrückgang bei der

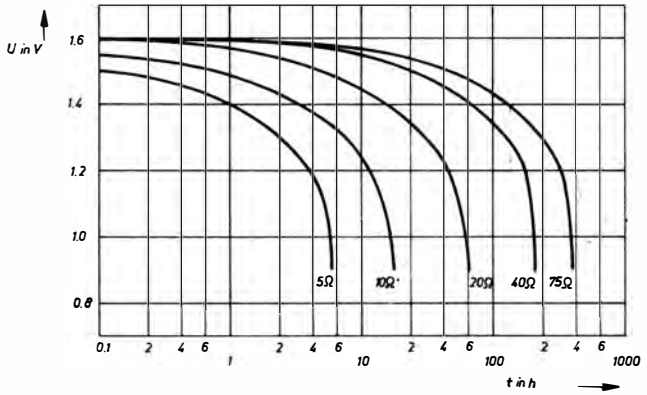


Bild 2.6 Belastungskennlinie einer Gerätezelle R 20

Entladung ist vor allem auf Veränderungen der Braunsteinelektrode zurückzuführen, die das Verhalten des Innenwiderstands der Zelle wesentlich bestimmt.

Den Einfluß des Innenwiderstands erkennt man besonders am Kennlinienfeld in Bild 2.6. Wird das Kohle-Zink-Element schwächer belastet, so vergrößert sich die Betriebszeit überproportional. Ein Vergleich ergibt bei Belastung mit $R_a = 5\,\Omega$ etwa 5 Stunden Betriebszeit, bei $R_a = 20\,\Omega$, dem vierfachen Wert, bereits etwa 70 Stunden Betriebszeit. Dieses Verhalten ist auf die Reaktionen im Braunstein zurückzuführen, der bei kleineren Belastungsströmen besser ausgenutzt wird. Das gleiche Verhalten zeigen auch höher belastbare Zellen, nur daß sich die Ladeschlußspannungen nach größeren Entladezeiten auf der Zeitachse, nach rechts verschoben, einstellen.

Auf das spezifische Verhalten der Braunsteinelektrode ist auch eine andere Eigenschaft des Kohle-Zink-Elements zurückzuführen, die *Erholbarkeit.* Belastet man eine Zelle intermittierend, z. B. täglich nur 4 Stunden, so erholt sie sich in den Pausenzeiten. Elektrisch stellt man das am Steigen der Klemmenspannung während der Pausenzeit fest. Die Kennlinien in Bild 2.7 lassen dieses Verhalten deutlich erkennen; die Klemmenspannung steigt durch die Erholung wieder um etwa 0,15 V, also fast um 10% an. Daß damit auch ein Kapazitätsgewinn verbunden ist, ergibt sich aus

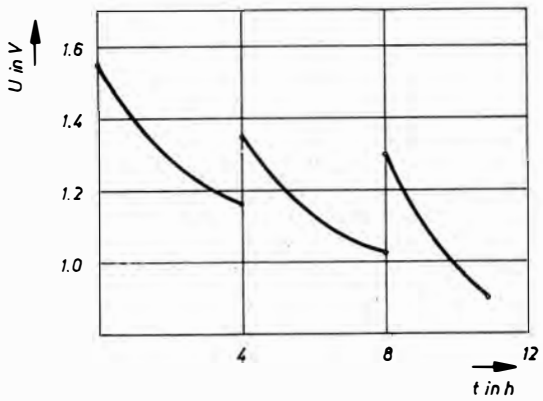


Bild 2.7 Entladekennlinie einer Gerätezelle R 20 bei intermittierender Belastung

den Kennlinien in Bild 2.8. Gleiche Entladeschlußspannung und Belastung vorausgesetzt, bringt die intermittierende Belastung einen Kapazitätsgewinn von fast 50%. Daraus leitet sich eine

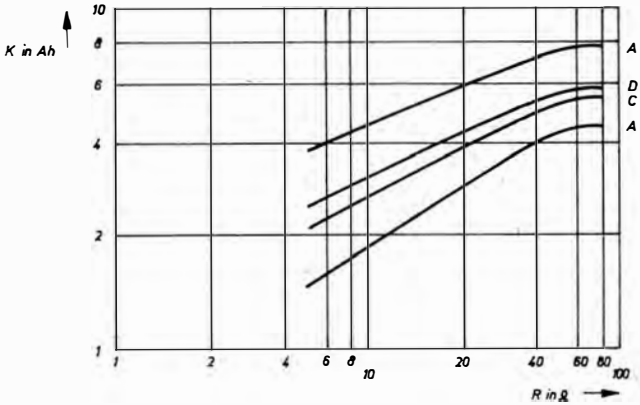


Bild 2.8 Belastungsverhalten der Kapazität einer Gerätezelle R 20. A — Dauerentladung bis 0,9 V; B — 4 Stunden täglich bis 0,9 V einer auslaufsicheren Zelle R 20; C — Dauerentladung bis 0,9 V; D — Dauerentladung bis 0,75 V

wichtige anwendungstechnische Konsequenz ab, auf die bereits an dieser Stelle verwiesen sei. Durch intermittierende Belastung läßt sich die nutzbare Kapazität eines Kohle-Zink-Elements oder, was gleichbedeutend ist, die Nutzungszeit erheblich steigern. Antriebe mit Kohle-Zink-Elementen also zur Verringerung des Kostenfaktors möglichst nicht im Dauerbetrieb bis zum Erreichen der Entladeschlußspannung betreiben. Pausen helfen Geld sparen!

Aus den Kennlinien ist weiter ersichtlich, daß die nutzbare Kapazität wegen des relativ großen Innenwiderstands mit steigender Belastung (kleinerer Wert von R_a) rapide abnimmt. Senkt man z. B. die Belastung auf ein Drittel (von $R_a = 8\,\Omega$ auf $R_a = 24\,\Omega$), so kann man einer Gerätezelle R 20 die doppelte Kapazität entnehmen. „Milde" Belastung, so wird die Belastung mit größerem Lastwiderstand bzw. kleinerem Entladestrom bezeichnet, hilft also ebenfalls Geld sparen. In der Praxis sind die Zusammenhänge etwas komplizierter, da die Begriffe „mild" und „hart" genau wie der Begriff „belastungsfähig" nicht genau definiert sind. Das, was z. B. für eine Gerätezelle „harte" Belastung ist, gilt für die auslaufsichere Zelle als „milde" Belastung. Unter diesem Aspekt ist es durchaus angebracht, mit verschiedenen Zellentypen zu experimentieren und unter gleichen Bedingungen den günstigsten Kostenfaktor zu ermitteln. Im gewählten Beispiel hat die auslaufsichere Zelle gegenüber der Gerätezelle nicht nur die größere nutzbare Kapazität, sondern auch einen erheblich höheren Preis.

Für den Anwender von Kohle-Zink-Elementen hat der Temperatureinfluß auf das Verhalten dieser Elemente besondere Bedeutung, speziell dabei die Rückwirkung der Umgebungstemperatur auf die Kapazität und damit auf die Betriebszeit des Antriebs. Der Zusammenhang von Kapazität und Umgebungstemperatur ist aus den Kennlinien in Bild 2.9 abzulesen. Danach sinkt die nutzbare Kapazität einer Kohle-Zink-Zelle bei der Temperatur von −10 °C auf die Hälfte des Wertes bei + 20 °C. Dagegen geht die Selbstentladung, die bei längerer Lagerung zu erheblichen Kapazitätsverlusten führt, bei tieferen Temperaturen auf ein Minimum zurück. Muß man Zellen längere Zeit lagern, so sollen sie möglichst kühl und trocken aufbewahrt werden. Generell gelten für den Betrieb von Kohle-Zink-Elementen hinsichtlich des Temperatureinflusses folgende Hinweise [10]:

< 20 °C – keine Entladung möglich;

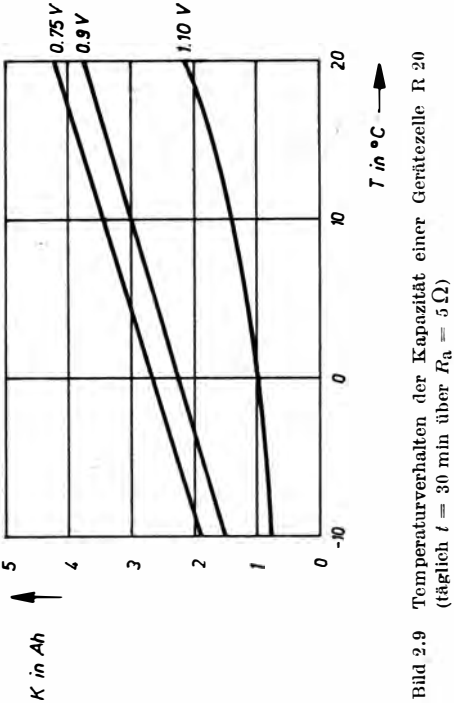


Bild 2.9 Temperaturverhalten der Kapazität einer Gerätezelle R 20 (täglich $t = 30$ min über $R_a = 5\,\Omega$)

$<$ 0 °C — Entladung mit verminderter Belastung und Kapazitätsentnahme möglich, Zellen ohne Verluste lagerfähig;

+20 °C — normale Entladung möglich, gute Lagerfähigkeit;

+40 °C — normale Entladung möglich, stärkere Kapazitätsverluste bei längerer Lagerung;

$>$ +50 °C — starke Selbstentladung der Zelle, mechanische Gefährdung des Zellenaufbaus.

Die Lagerfähigkeit der Zellen wird aber nicht nur von der Temperatur beeinflußt, sondern auch vom Zellenaufbau. Zum Beispiel haben auslaufsichere Zellen auf Grund ihrer Konstruktion eine wesentlich bessere Lagerfähigkeit und besseres Tieftemperaturverhalten als Gerätezellen.

Primärelemente sind für einmalige Entladung konstruiert. Eine Umkehrung des elektrochemischen Vorgangs des Entladens als Laden wie beim Akkumulator ist nicht vorgesehen. Trotzdem kann man in gewissen Grenzen durch asymmetrisches Wechselstromladen das im Elektrolyten gelöste Zink wieder am Zinkbecher als Metall abscheiden und damit einen dem *Laden* ähnlichen Effekt erzielen. Im Unterschied zum Laden bei Akkumulatoren wird dieser Vorgang bei Trockenelementen als *Reaktivieren* bezeichnet. Das Bemühen, Primärelemente zu reaktivieren, gibt es praktisch schon so lange, wie es diese Elemente selbst gibt. Von verschiedenen Verfahren hat sich das asymmetrische Wechselstromladen, auf das *E. Beer* 1954 ein Patent erhielt, am besten bewährt. Auf das Verfahren selbst wird im Band 3 näher eingegegangen. An dieser Stelle ist zum Reaktivieren von Kohle-Zink-Elementen folgendes zu sagen:

- Durch Reaktivieren läßt sich die nutzbare Kapazität einer Primärzelle auf das 20fache erhöhen.
- Das Reaktivieren ist nur erfolgreich, wenn man die Bedingungen dafür genau einhält.
- Bei der Verwendung reaktivierter Zellen ist Vorsicht geboten, da die Klemmenspannung 1,7 V je Zelle übersteigen kann. Diese hohe Klemmenspannung wird bei Belastung schnell abgebaut.
- Das Reaktivieren hat einen relativ schlechten Wirkungsgrad (etwa 50%) und bedingt damit eine lange Reaktivierungszeit.
- Die Zellen lassen sich um so besser reaktivieren, je weniger sie entladen sind. Das Reaktivieren wird zweckmäßig gleich im Anschluß an das Entladen vorgenommen.
- Vollständig entladene Zellen können nicht reaktiviert werden.
- Unsachgemäßes Reaktivieren führt zur Elektrolyse in der Zelle und damit im einfachsten Fall zum Elektrolytverlust (austrocknen), im ungünstigsten Fall zum Platzen der Zellen. Vorsicht!

2.3. Alkali-Mangan-Element

Das Alkali-Mangan-Element ist die Weiterentwicklung des Kohle-Zink-Elements. Für härtere Anwendungen in Elektronik- und Filmgeräten genügten die Kohle-Zink-Zellen nicht mehr den An-

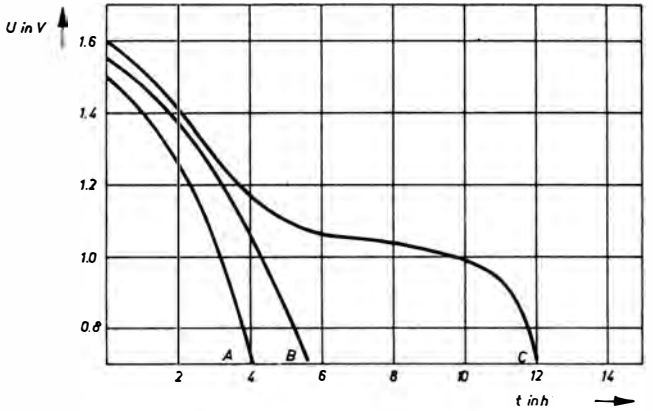


Bild 2.10 Belastungsverhalten einer Alkali-Mangan-Zelle (C) im Vergleich zu einer auslaufsicheren Zelle (B) und einer Gerätezelle (A)

forderungen. Das Alkali-Mangan-Element bietet gegenüber dem Kohle-Zink-Element nicht nur etwa die doppelte Energiedichte von $W_D = (200 \ldots 300)\,\mathrm{mW \cdot h/cm^3}$ (s. Bild 2.1) und damit höhere Kapazitätswerte, sondern einen weiteren Belastungsspielraum (günstigeres Verhalten bei harten Belastungen) und verbessertes Tieftemperaturverhalten. Zum Beispiel können Alkali-Mangan-Zellen noch bei Temperaturen bis zu −40 °C eingesetzt werden. Hinzu kommt, daß die Alkali-Mangan-Zelle bei gleicher Klemmenspannung eine bessere Spannungslage hat (Bild 2.10).

Für die Herstellung der Alkali-Mangan-Zellen mußte eine Reihe von technologischen Problemen gelöst werden, die vor allem daher rühren, daß als Elektrolyt Kalilauge verwendet wird. Die Kalilauge greift das Zink stark an, und kriecht sehr gut, auch durch kleinste Zwischenräume. Es wurde ein besonderer Zellenaufbau mit speziellen Werkstoffen und Dichtungen, anders als beim Kohle-Zink-Element, entwickelt (Bild 2.11). Beim Alkali-Mangan-Element bildet ebenfalls Zink die positive Elektrode und Braunstein (MnO_2) die negative Elektrode. Alkali-Mangan-Zellen werden in den gleichen Abmessungen (R6 — Mignonzelle, R14 — Babyzelle, R 20 — Monozelle) wie die Kohle-Zink-Zellen hergestellt (Bild 2.12). Da sie auch die gleiche Klemmenspannung von

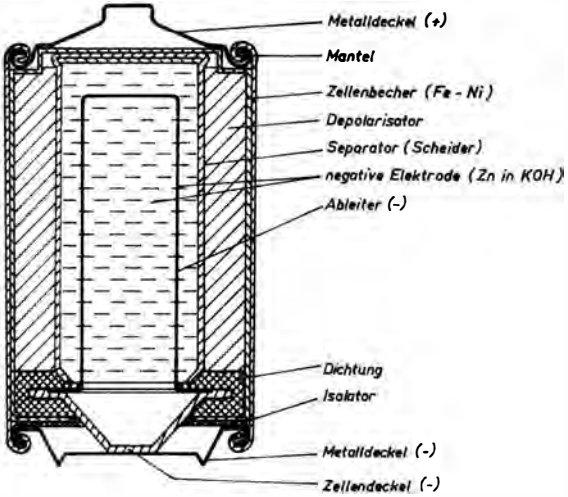


Bild 2.11 Aufbau einer Alkali-Mangan-Zelle

1,5 V je Zelle haben, sind sie bei der Anwendung gegeneinander austauschbar. Allerdings liegt der Preis von Alkali-Mangan-Zellen erheblich über dem der Kohle-Zink-Zellen.
Alkali-Mangan-Zellen werden in der DDR z. Z. noch nicht hergestellt und stehen nur aus Importen zur Verfügung. Einige Typen von Alkali-Mangan-Zellen sind reaktivierbar (s. a. Abschnitt 2.5. und die Ausführungen im Band 3).

Bild 2.12
Bauformen von Alkali-Mangan-Zellen (R 6, R 14, R 20)

2.4. Lithium-Element

Aus der Darstellung Bild 2.1 ist ersichtlich, daß das Bestreben der Techniker dahin gehen würde, für spezielle Anwendungen die hohe Energiedichte von $W_D = (650 \ldots 800)$ mW · h · cm^{-3} bei Lithium-Elementen technisch auszunutzen. Hinzu kommt, daß Lithium-Elemente im Vergleich zu anderen Elementen hohe Klemmenspannungen von $U_Z = (2{,}0 \ldots 3{,}5)$ V und ein sehr gutes Lagerverhalten aufweisen. Es wurden verschiedene Lithiumsysteme entwickelt, die sich in bezug auf den Elektrolyten und die Art der positiven Elektrode (Oxydationsmittel) unterscheiden. Mit Erfolg verwendet man organische Elektrolyte.

Die Entwicklung der Lithium-Zellen wurde ganz wesentlich durch die Forderungen der Raumfahrttechnik stimuliert. Diese Zellen sind ein echter technischer Fortschritt, der aber nicht ganz problemlos ist. Als erstes wären die Herstellungskosten zu nennen. Lithium-Zellen können nur nach einer speziellen, kostenaufwendigen Technologie hergestellt werden. Zweitens sind Lithium-Zellen wegen der höheren Klemmenspannung nicht einfach gegen konventionelle Primärzellen austauschbar. Drittens hat der organische Elektrolyt einen hohen Dampfdruck, der bei eventuellem Kurzschluß zum Platzen der Zellen und damit zur Gefährdung des Geräts führt. Je nach Ladezustand liegt der Innendruck der Zelle zwischen 10 at und 27 at.

Diesen anwendungseinschränkenden Eigenschaften stehen aber eine ganze Reihe sehr positiver Eigenschaften gegenüber:

- Lithium-Zellen sind gasdicht, auslaufsicher, schock- und vibrationsfest.
- Sie haben eine gute Spannungslage und eine hohe Zuverlässigkeit.
- Die Zellen sind etwa 10 Jahre lagerfähig und haben auch bei erhöhten Temperaturen eine geringe Selbstentladung.
- Die Zellen arbeiten in dem Temperaturbereich von −50 °C bis + 75 °C zuverlässig!

Lithium-Zellen werden in den internationalen Standardabmessungen (auch R 6, R 14 und R 20) mit Kapazitäten $K = (0{,}52 \ldots 10)$ Ah hergestellt. Sie sind im Prinzip überall dort anwendbar, wo auch andere Primärelemente eingesetzt werden. Allerdings schränken der hohe Preis und die Beschaffungsmöglichkeit die Anwendung für Modellantriebe erheblich ein. Es sei aber darauf

verwiesen, daß im Elektroflug mit Lithium-Zellen erfolgreiche Rekordversuche unternommen wurden.

Um das typische Verhalten von Lithium-Zellen bei Belastung einschätzen zu können, werden im folgenden die Belastungskennlinien der *Eternacell*-Lithium-Zellen (550 D) diskutiert. Diese Zellen mit den Abmessungen einer Monozelle (R 20) haben folgende Daten:

Klemmenspannung $U_Z = 2{,}8$ V;
Kapazität $K = 8{,}0$ Ah;
Durchmesser = 33,5 mm, Höhe = 61,0 mm;
Masse $m = 85$ g.

Die Zelle wird auch als HR-Zelle für 1- bis 2stündige Hochstromentladung hergestellt. Am Verlauf der Belastungskennlinien (Bild 2.13) erkennt man vor allem die flache Spannungslage bei mildem Betrieb. Bei härterem Betrieb wirkt sich der relativ hohe Innenwiderstand nachteilig auf die nutzbare Kapazität aus. Die Klemmenspannung sinkt dann schnell bei schlechter Spannungslage. Damit ist dieser Zellentyp für Hochstromentladungen bei Rekordversuchen [Dauerstrom $I_E = (5 \ldots 10)$ A] nur wenig geeignet. Für diese Zwecke sind HR-Zellen zweckmäßiger, die einen geringeren Innenwiderstand haben.

Imponierend ist das Lagerverhalten der Lithium-Zellen. Bei Raumtemperaturen von +20 °C beträgt die Selbstentladung
— nach 6 Monaten 2% Kapazitätsverlust,
— nach 30 Monaten 60% Kapazitätsverlust

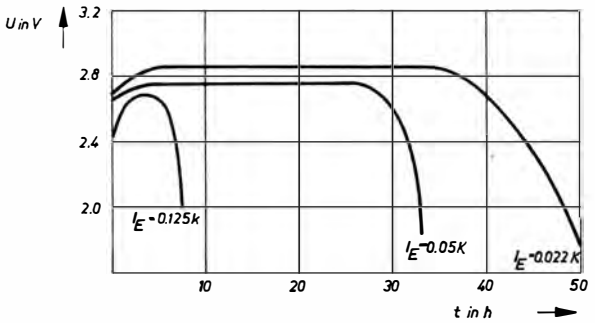


Bild 2.13 Entladekennlinie einer Lithium-Zelle 550 D (R 20)

und bei der Temperatur von +55 °C
— nach 6 Monaten 12% Kapazitätsverlust,
— nach 30 Monaten 19% Kapazitätsverlust.

2.5. Anwendungstechnische Hinweise

Will der Amateur sein elektrogetriebenes Modell mit geeigneten Spannungsquellen ausstatten, so sind dabei eine ganze Reihe von Faktoren zu beachten. Fehlentscheidungen bedeuten meist nicht nur eine finanzielle Einbuße, sondern auch Enttäuschungen. Bei der Auswahl eines Elementtyps sind der Innenwiderstand, der Belastungsstrom, die Belastbarkeit, die Entladecharakteristik und die Lagerfähigkeit entscheidende Kriterien. Über ihre Größe und wechselseitige Abhängigkeit muß man sich bei der Auswahl im klaren sein. Daher notiert man sich bei der Konstruktion eines Modellantriebs am besten folgende gegebene Faktoren:
— Betriebsspannung (Maximal-, Minimalwert),
— Entladestrom (Maximalwert),
— Entladeart (dauernd, intermittierend),
— geplante Kapazität bzw. Betriebszeit,
— Batterieraum,
— Batteriegewicht (Maximalwert).
Diesen Angaben werden die möglichen Lösungsvarianten gegenübergestellt. Die Kosten für eine Betriebsstunde und die Beschaffungsmöglichkeit entscheiden dann meist, welche Variante man wählt. Auf der Basis dieser Variantenrechnung führt man zielgerichtete Experimente mit unterschiedlichen Primärelementen durch, um optimale Antriebsleistungen zu erreichen. Wird das Modell mit Primärelementen bestückt, so sollte man auf jeden Fall den Typ wählen, den es ständig im Handel gibt. Damit der Antrieb auch tatsächlich die beabsichtigte Leistung bringt, werden nur Zellen oder Batterien gekauft, die nicht älter als 2 Monate sind. Auf jeder Zelle oder Batterie ist das Herstellungsdatum (Woche und Jahr) aufgestempelt oder eingeprägt. Man kauft Primärelemente wegen der Selbstentladung nicht auf Vorrat. Wenn einige nichterschöpfte Elemente vorhanden sind, lagert man sie kühl und trocken. An dieser Stelle sei auch auf solche für die Anwendung wichtigen Eigenschaften der Primärelemente verwiesen wie

— ihre Erholbarkeit bei intermittierendem Betrieb
— die starke Belastungsabhängigkeit der Kapazität (harter oder milder Betrieb!).

Kohle-Zink-Elemente und einige Alkali-Mangan-Elemente sind reaktivierbar. Durch das Reaktivieren der Zellen können die Betriebskosten eines Modells mit Primärelementen erheblich gesenkt werden. Bei genauer Anwendung der Reaktivierungsvorschrift läßt sich die nutzbare Kapazität auf das 20fache steigern. Überlagerte Zellen (länger als ein halbes Jahr gelagert) prüft man vor dem Einsatz im Modell mit der Kurzschlußprobe. Durch Selbstentladung steigt der Innenwiderstand der Zelle und ist damit ein Maß für die verfügbare Kapazität der Zelle. Schließt man die Zelle mit einem Amperemeter kurz, so kann der Kurzschlußstrom gemessen werden. Ist der gemessene Wert kleiner als 50% des Nennwerts oder sinkt der Kurzschlußstrom während der Messung rapide, so ist die Zelle unbrauchbar. Die Kurzschlußprobe darf auf keinen Fall länger als 2 s dauern! Richtwerte für die Kurzschlußprobe frischer Primärelemente sind in Tabelle 2.1. angegeben.

Es ist darauf zu achten, daß das Meßgerät entsprechend belastbar sein muß!

Für die Anwendung der Primärelemente ist es ein großer Vorteil, daß es sich bei allen Typen um Trockenelemente handelt. Sie können in beliebiger Lage im Modell eingebaut werden. Auf gute und sichere Kontaktgabe bei den zu Batterien geschalteten Zellen muß man besonderen Wert legen, ebenso auf ausreichenden Querschnitt der Zuleitungen. Unnötig vergrößerte Kontaktwiderstände verkürzen nicht nur die Betriebszeit und mindern die Leistung, sondern verursachen auch zusätzliche Kosten. Wo

Tabelle 2.1. Kurzschlußströme von Kohle-Zink-Elementen

Typ	R6	R 20 Gerätezelle	R 20 Beleuchtungszelle	R 20 auslaufsichere Zelle	3 R 12
I_K in A	6	7	9	18	6

irgend möglich, sollte man daher die Verbindungen löten und lösbare Anschlüsse schrauben oder als Flachstecker ausrühren. Vergißt man z. B., bei erschöpften Zellen den Antrieb auszuschalten, so hat der Elektrolyt nach einigen Tagen den Zinkbecher durchfressen, durchweicht die Papphülle und tritt aus. Außerdem quellen die Zellen stark. Um das Modell vor austretendem Elektrolyten zu schützen, baut man für die Primärzellen ein dichtes Kunststoffgehäuse (PVC oder Polystyrol). Dieser geringe Mehraufwand lohnt sich in jedem Fall, denn dieses Gehäuse kann gleich als Batteriefach im Modell mit entsprechenden Zellenhalterungen konstruiert werden. Sicherheitshalber entfernt man Primärelemente aus dem Modell, wenn es länger als eine Woche nicht benutzt wird! Sind einzelne Zellen eines Batteriesatzes erschöpft, so wird der gesamte Satz ausgewechselt bzw. reaktiviert. Auf keinen Fall einzelne Zellen aus falsch verstandener „Sparsamkeit" auswechseln. Das gilt für alle Arten und Typen von Primärzellen.

3. Blei-Akkumulatoren

3.1. Allgemeines

Bereits 1859 wurde von *G. Plante* nach Vorarbeiten von *Sinsteden* der erste funktionsfähige Blei-Akkumulator in Betrieb genommen. Seither ist dieses Akkumulatorsystem ständig weiterentwickelt worden. Durch neue Technologien und die Verwendung reiner Werkstoffe konnten solche wichtigen Parameter wie Kapazität je Zellengewicht und Zellenvolumen, Tieftemperaturverhalten, Selbstentladung, Lebensdauer, Zuverlässigkeit, Hochstrombelastungsfähigkeit und Wartungsaufwand ständig verbessert werden. Die jüngsten Entwicklungen sind besonders darauf gerichtet, den Blei-Akkumulator gasdicht und wartungsfrei zu machen. Selbst wenn der Blei-Akkumulator bei gleicher Kapazität ein größeres Gewicht und eine geringere Lebensdauer als der Nickel-Kadmium-Akkumulator hat, so ist er doch wegen seines Preises und der Vielseitigkeit der Anwendung nach wie vor der Standardakkumulator, auch für den Amateur. Die Entwicklung von wartungsfreien Blei-Akkumulatoren bei den zu erwartenden niedrigen Kosten lassen diesen Typ dann auch wieder für Anwendungen z. B. in tragbaren Geräten attraktiv werden, die bisher dem Nickel-Kadmium-Akkumulator vorbehalten waren. Einsatzbereiche für den Blei-Akkumulator sind im Rahmen dieser Publikation der Modellantrieb, darüber hinaus aber auch Fernseh-, Funk- und Videobandgeräte, Radios, Filmkameras, Filmleuchten, Blitzgeräte, tragbare Meß- und medizinische Geräte, Alarmanlagen u. a. m. Zu den Vorzügen des Blei-Akkumulators zählen:

— Er ist hoch belastbar.
— Mit 2 V hat er die höchste Zellenspannung der gebräuchlichen Systeme.
— Er ist längere Zeit lager- und gebrauchsfähig.
— Er hat eine gute Spannungslage.
— Er eignet sich für den Pufferbetrieb.
— Der Ladezustand ist einfach zu kontrollieren (bei offenen Typen).

— Er ist preisgünstig im Vergleich zu anderen Systemen.

Es sei aber auch betont, daß mehrere dieser positiven Eigenschaften nur bei genauer Einhaltung der Pflege- und Wartungsvorschriften wirksam werden. Den positiven Eigenschaften stehen einige Nachteile gegenüber, die man für den Einsatz ebenfalls berücksichtigen muß. Dazu zählen:

— die relativ kurze Lebensdauer im Vergleich zum Nickel-Kadmium-Akkumulator (2 bis 3 Jahre oder 200 bis 1000 Zyklen je nach Einsatzbedingungen),
— hohe Selbstentladung,
— Empfindlichkeit gegen Überladen und Tiefentladen,
— mechanisch empfindlich gegen Stoß- und Rüttelbeanspruchungen,
— unbedingte sorgfältige Pflege und Wartung.

Die Blei-Akkumulatoren werden für die jeweilige Anwendung konstruiert. Dabei unterscheidet man folgende Typen:

— offene Zelle für Dauerladung (Bereitschaftsbetrieb),
— offene Zelle für Zyklenbetrieb (Lade-Entlade-Betrieb mit Hochstrombelastungen, z. B. in Fahrzeugen u. ä.),
— wartungsfreie Zelle für Dauerladung,
— wartungsfreie Zelle für Zyklenbetrieb.

Es muß betont werden, daß gerade der gasdichte und damit wartungsfreie Zellentyp in den letzten Jahren entscheidend weiterentwickelt wurde. Gasdichte Zellen gab es 1976 bereits mit Kapazitäten von $K_{20} = 0{,}9$ Ah bis $K_{20} = 36$ Ah.

Beim Blei-Akkumulator wird die Nennkapazität K_{20} auf die 20stündige Konstantstromentladung bezogen.

3.2. Offene Blei-Akkumulatoren

3.2.1. Funktion und Aufbau

Im geladenen Zustand besteht beim Blei-Akkumulator die negative Elektrode aus Blei (Pb) und die positive Elektrode aus Blei-Dioxid (PbO_2). Nach der Entladung bestehen beide Platten aus Bleisulfat ($PbSO_4$). Als Elektrolyt dient verdünnte Schwefelsäure (H_2SO_4) mit der Dichte 1,28 g · cm^{-3}. Die chemischen Vorgänge in der Zelle werden durch die Gleichung

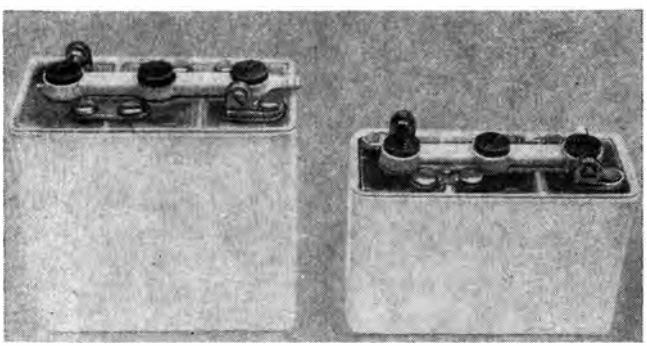
$$PbO_2 + Pb + 2\ H_2SO_4 \underset{\text{Laden}}{\overset{\text{Entladen}}{\rightleftharpoons}} 2\ PbSO_4 + 2\ H_2O$$

beschrieben. Aus dieser Gleichung läßt sich ferner ablesen, daß Schwefelsäure beim Laden und Entladen umgewandelt wird. Das kand man äußerlich an der Dichteänderung Elektrolyten erkennen. Die Säuredichte beträgt im geladenen Zustand (1,26 ... 1,28) $g \cdot cm^{-3}$ und im entladenen Zustand $1{,}10 \cdot g\ cm^{-3}$. Damit bietet die Messung der Säuredichte eine gute Möglichkeit, den Ladezustand des Blei-Akkumulators zu bestimmen. In der Praxis verwendet man zur Ladezustandsbestimmung Aräometer, das sind Säureheber mit einer Meßspindel. Die Eintauchtiefe der Meßspindel im herrausgesaugten Elektrolyten ist der Säuredichte proportional, so daß sich damit der Ladezustand direkt ablesen läßt

Einfache Ladezustandsanzeiger haben nur 3 verschiedenfarbige und auch unterschiedlich schwere Kugeln zur Anzeige (Bild 3.1b). Bei der Ladezustandskontrolle bedeuten:

Alle Kugeln schwimmen $\triangleq$ 100% Kapazität,
1 Kugel (meist schwarz) sinkt $\triangleq$ etwa 90% Kapazität,
2 Kugeln (meist schwarz und rot) sinken $\triangleq$ etwa 70% Kapazität.
3 Kugeln (schwarz, rot und grün) sinken $\triangleq$ etwa 25% Kapazität.

Bei Blei-Akkumulatoren mit durchsichtigen Kunststoffgefäßen können an der Seite Schauröhrchen angebracht sein, in denen sich



a)

b)

Bild 3.1
Bauformen von offenen Blei-Akkumulatoren: a — Kfz-Akkumulatoren 6 V/4,5 Ah und 6 V/12 Ah; b — mit Ladezustandsanzeige 2 V/6 Ah.

3 Kugeln für die Ladezustandskontrolle in der beschriebenen Weise befinden. Allerdings gilt diese Anzeige nur für die Umgebungstemperatur + 20 °C und die Säuredichte 1,28 $g \cdot cm^{-3}$. Bei abweichenden Temperaturen und Säuredichten sind daher Fehlanzeigen möglich.

Das beim Entladen entstehende Bleisulfat kann einmal in feinkörniger, leicht umwandelbarer Form oder in grobkörniger Form, die durch Laden und Entladen nicht mehr umwandelbar ist, vorliegen. Das Entstehen von grobkörnigem Bleisulfat in den Platten bezeichnet man auch als *Sulfatisierung*, es führt zu einem bleibenden Kapazitätsverlust der Zelle. Sulfatisieren wird hauptsächlich durch Selbstentladung, die nicht durch regelmäßiges Aufladen unterbrochen ist, hervorgerufen.

Die Bauformen der Platten des Blei-Akkumulators sind sehr unterschiedlich. Man unterscheidet die positive Großoberflächenplatte, die positive und die negative Gitterplatte, die negative Kastenplatte, um nur einige zu nennen. Auf die Vor- und Nachteile der jeweiligen Bauform sei nicht näher eingegangen. Für den Anwender ist nur wichtig zu wissen, daß die aktive Masse beim Laden und Entladen chemisch verändert wird und infolge der Kristallisationsvorgänge aus den Platten, besonders aus der positiven Platte, ausfällt. Dieser Verlust an aktiver Masse begrenzt die Lebensdauer des Blei-Akkumulators. Die ausgefallene aktive Masse sammelt sich als Bleischlamm am Boden des Ge-

fäßes. Die ausgefallene Masse kann im ungünstigen Fall auch zur Brückenbildung zwischen den positiven und negativen Platten führen. Schwache Brückenbildung bewirkt eine verstärkte Selbstentladung der Zelle, starke Brücken verursachen Plattenschluß, so daß die Zelle unbrauchbar wird.
Da sich die Platten durch starke mechanische Beanspruchung (transportable Geräte und Fahrzeuge) verziehen und auf diese Weise ebenfalls einen Plattenschluß herbeiführen können, werden sie durch einen welligen porösen oder perforierten Scheider aus Kunststoff oder auch durch Gewebescheider getrennt.
Das Gefäß des Blei-Akkumulators besteht aus Hartgummi oder einem thermoplastischen Kunststoff (Polystyrol, Polyäthylen, Polypropylen o. a.), bei ortsfesten Batterien auch aus Glas. Zur Herstellung von Batterien werden unterteilte Gefäße verwendet, die Zellen unlösbar zusammengeschaltet (6 V, 12 V, 24 V) und vergossen. Einzelzellen für transportable Blei-Akkumulatoren sind sehr selten (Bild 3.1). Das Zellengefäß hat einen Schraubverschluß mit eingebautem Ventil. Durch das Ventil können in der Zelle entstehende Gase entweichen, es verhindert aber auch das Auslaufen von Elektrolytflüssigkeit. Für die Instandsetzungs- und Wartungsarbeiten wird der Schraubverschluß geöffnet.

3.2.2. Pflege und Wartung

Seine Nenndaten (Kapazität und Lebensdauer) erreicht der Blei-Akkumulator nur bei Einhaltung der Pflege- und Wartungsvorschriften.

Pflege
Der Akkumulator ist vor der Inbetriebnahme zu reinigen, die Ventile in den Verschlußklappen werden auf Funktion geprüft. Die Kontakte sind mit Pol- oder Kontaktfett leicht einzufetten. Dabei muß man darauf achten, daß das Fett nicht auf die Vergußmasse oder in das Zelleninnere gelangt. Tritt beim Laden oder Verkanten des Akkumulators Säure aus, so wird sie mit warmem Wasser abgewaschen. Dabei darf kein Wasser in das Innere gelangen. Bilden sich nach längerer Benutzung an den Polen Verkrustungen, dann wäscht bzw. kratzt man sie vorsichtig ab und fettet die Pole ein. Gelagert werden Blei-Akkumulatoren in

trockenen, belüfteten Räumen bei möglichst +20 °C. Gefüllt gelagerte Zellen bzw. Batterien muß man ständig warten. Ungefüllt können Blei-Akkumulatoren ohne Wartung mehrere Jahre lagern.

Wartung — Inbetriebnahme

Am gereinigten Akkumulator werden die Verschlußstopfen der Zellen herausgeschraubt, die Schutzeinlage wird entfernt bzw. die Schutzhaut der Entgasungsöffnung durchstoßen. Danach füllt man die Zellen mit chemisch reiner Akkumulatoren-Schwefelsäure der Dichte $(1{,}28 \pm 0{,}01)\ g \cdot cm^{-3}$, gemessen bei +25 °C, bis zur angegebenen Markierung bzw. 5 mm über Scheideroberkante. Die Elektrolyttemperatur darf beim Füllen +25 °C nicht übersteigen. Für Umgebungstemperaturen über +30 °C (Tropenverhältnisse) beträgt die Säuredichte $(1{,}22 \pm 0{,}01)\ g \cdot cm^{-3}$. Die Zelle oder die Batterie läßt man nach dem Füllen 4 bis 5 Stunden stehen, damit der Elektrolyt die Platten gut durchtränken kann. Danach füllt man Schwefelsäure der Dichte $1{,}28\ g \cdot cm^{-3}$ bis zur angegebenen Markierung bzw. 5 mm über Scheideroberkante auf. Nun kann die Inbetriebsetzungsladung vorgenommen werden (s. Abschnitt 3.2.3.). Die Verschlußstopfen schraubt man erst nach dem Beenden des Ladens wieder ein.

Wartung geladener Zellen

Der Säurestand und der Ladezustand werden, auch bei nichtbenutzten Zellen, alle 4 Wochen kontrolliert und gegebenenfalls nachgefüllt sowie nachgeladen. Infolge Elektrolyse gast der Blei-Akkumulator beim Laden und Entladen. Der dadurch entstehende Flüssigkeitsverlust ist auf jeden Fall nur durch Nachfüllen von destilliertem Wasser (aqua dest.) auszugleichen. Schwefelsäure der Dichte $1{,}28\ g \cdot cm^{-3}$ wird nur dann nachgefüllt, wenn durch Austreten beim Laden oder Verschütten ein Elektrolytverlust eingetreten ist. Vollständig entladene Zellen oder Batterien lädt man erst und füllt dann destilliertes Wasser nach. Damit sich Elektrolyt und Wasser gut durchmischen, wird noch 30 min weitergeladen. Beim Nachfüllen der Zellen soll der angegebene obere Säurestand nicht überschritten werden, da sonst die Kippsicherheit beeinträchtigt ist. Ausgetretene bzw. verschüttete Schwefelsäure ätzt stark und kann am Modell oder Gerät erhebliche und auch kostspielige Schäden verursachen.

Beim Entladen sinkt auf Grund der chemischen Veränderungen der Elektrolytspiegel. Er steigt beim Aufladen wieder bis zum alten Stand (Markierung bzw. 5 mm über Scheideroberkante). Daher soll auch nur bei der geladenen Zelle Wasser nachgefüllt werden. Durch Selbstentladung sulfatisieren die Platten (s. Abschnitt 3.2.1.), so daß ein Kapazitätsverlust eintritt. Aus diesem Grunde ist dem regelmäßigen Nachladen auch bei Nichtbenutzung besondere Aufmerksamkeit zu schenken. Der Blei-Akkumulator darf auf keinen Fall längere Zeit entladen gelagert werden!

3.2.3. Laden

Inbetriebsetzungsladen

Die Zelle oder Batterie wird, wie im Abschnitt Wartung beschrieben, zum Inbetriebsetzungsladen vorbereitet. Man lädt mit $I_L = 0{,}1 \cdot K_{20}$ so lange, bis alle Zellen gleichmäßig und lebhaft gasen. Die Ladeschlußspannung beträgt (2,6 ... 2,7) V je Zelle und die Säuredichte 1,28 g · cm^{-3}. Die Zelle ist 100% geladen, wenn sich diese Werte während des Ladens in den letzten 2 Stunden nicht mehr ändern. Während des Inbetriebsetzungsladens darf die Elektrolyttemperatur +50 °C nicht überschreiten, andernfalls ist das Laden zu unterbrechen oder der Ladestrom zu verringern, damit der Elektrolyt abkühlt. Nach 20 bis 25 Stunden soll das Inbetriebsetzungsladen beendet sein. Nach Beendigung des Inbetriebsetzungsladens wird der Elektrolytstand kontrolliert und, falls erforderlich, korrigiert. Nun entlädt man den Akkumulator mit $I_E = (0{,}1 \ldots 0{,}3)\ K_{20}$ bis zur Entladeschlußspannung von 1,75 V je Zelle. Daran schließen sich noch 2 Ladezyklen mit $I_L = 0{,}1 \cdot K_{20}$ und 1 Entladezyklus mit $I_E = (0{,}1 \ldots 0{,}3)\ K_{20}$ an; erst dann ist der Blei-Akkumulator betriebsfertig und im Modell einsetzbar. Nach jedem Ladevorgang wird der Elektrolytstand kontrolliert und gegebenenfalls korrigiert. Die Elektrolyttemperatur darf beim Normalladen mit $I_L = 0{,}1 \cdot K_{20}$ ebenfalls +50 °C nicht überschreiten. Seine volle Kapazität (Nennkapazität laut Datenblatt) erreicht der Blei-Akkumulator erst durch Formierungsvorgänge in den Platten, d. h. je nach Typ erst nach 5 bis 20 Lade-Entlade-Zyklen.

Normalladen

Zum Normalladen von Blei-Akkumulatoren legt man am besten das Ladegerät speziell für diesen Zweck aus. Entsprechende Vorschläge werden im Band 3 unterbreitet. Das Normalladen mit $I_L = 0{,}1 \cdot K_{20}$ ist zeitkontrolliert oder spannungskontrolliert möglich. Die erforderliche Ladezeit beim zeitkontrollierten Normalladen kann man beim Blei-Akkumulator recht einfach durch Säuredichtemessung bestimmen. Für die Spannungskontrolle bietet sich die Anwendung eines *Schmitt*-Triggers an, der beim Erreichen der Ladeschlußspannung von 2,7 V je Zelle den Ladestrom abschaltet. Dem spannungskontrollierten Normalladen des Blei-Akkumulators kommt der typische Verlauf der Ladekennlinie (Bild 3.2) entgegen. Der steile Anstieg der Ladekennlinie zum Ladeschluß ermöglicht ein definiertes und auch genaues Abschalten. Ein längeres Überladen des Blei-Akkumulators verringert die Lebensdauer.

Der Blei-Akkumulator kann auch mit $I_L = 0{,}3 \cdot K_{20}$ beschleunigt geladen werden, allerdings muß man dann beim Erreichen der Gasungsspannung (2,4 V je Zelle) auf Normalladen mit $I_L = 0{,}1 \cdot K_{20}$ umschalten. Die Elektrolyttemperatur darf beim Normalladen und beschleunigten Laden +50 °C nicht überschreiten. Beim Laden werden die Verschlußstopfen der Zellen entfernt oder aber gelockert. Nach dem Laden kontrolliert man den Säurestand und korrigiert ihn gegebenenfalls, ehe man die Verschlußstopfen wieder einschraubt.

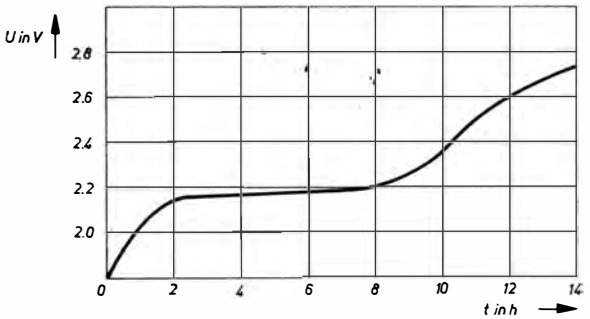


Bild 3.2 Ladekennlinie des offenen Blei-Akkumulators

Ausgleichsladen

Wird festgestellt, daß einzelne Zellen einer Batterie abfallen, d. h. durch unterschiedliche Entladung (Selbstentladung) Kapazitätsunterschiede zwischen den Zellen einer Batterie entstanden sind, so muß man das Ausgleichsladen durchführen. Ausgleichsladen entspricht dem Normalladen mit $I_L = 0{,}1 \cdot K_{20}$, aber mit der doppelten Zeit, also etwa 28 bis 30 Stunden.

3.2.4. Entladen

Bevor auf das Verhalten des Blei-Akkumulators beim Entladen näher eingegangen wird, sei noch einmal auf die Wartungsvorschrift verwiesen, daß der Akkumulator nicht längere Zeit entladen stehen darf. Bei Fahrzeugakkumulatoren wird das ständige Nachladen bei normaler Nutzungshäufigkeit durch entsprechende Reglereinstellung und den Fahrbetrieb gesichert. Beim Modellantrieb sollte das Nachladen möglichst gleich im Anschluß an das Entladen, also nach Heimkehr vom Wettkampf- bzw. Übungsgelände vorgenommen werden. Ist man in dieser Hinsicht nachlässig, so führt das Sulfatisieren der Platten zu vorzeitigem Kapazitätsverlust, und der Akkumulator übersteht kaum eine Saison. Bei genauer Einhaltung der Wartungsvorschriften kann er dagegen 4 Jahre lang ohne Beanstandung seinen Dienst versehen. Um jederzeit über den voll (100 %) geladenen Akkumulator verfügen zu können, sollte man ihn alle 4 Wochen nachladen. Damit wird der durch Selbstentladung entstehende Kapazitätsverlust ausgeglichen. Durch diese Maßnahmen erhöht sich außerdem die Betriebssicherheit, denn das Versagen eines vorschriftsmäßig gewarteten Akkumulators ist wesentlich unwahrscheinlicher als beim Außerachtlassen der Wartungsvorschriften.

Ein für den Anwender besonderer Vorzug des Blei-Akkumulators besteht in seinem niedrigen Innenwiderstand. Der Innenwiderstand einer Zelle hängt von Konstruktion und Kapazität ab. Wichtig aber ist, daß bei gegebenen Bedingungen (Gewicht, Batteriekapazität) der niedrige Innenwiderstand geringe innere Verluste zur Folge hat.

Der Blei-Akkumulator zeichnet sich ferner durch eine gute Spannungslage selbst bei hohen Belastungen aus (Bild 3.3). Die Grenze der Belastbarkeit bildet die Entladeschlußspannung, die mit zu-

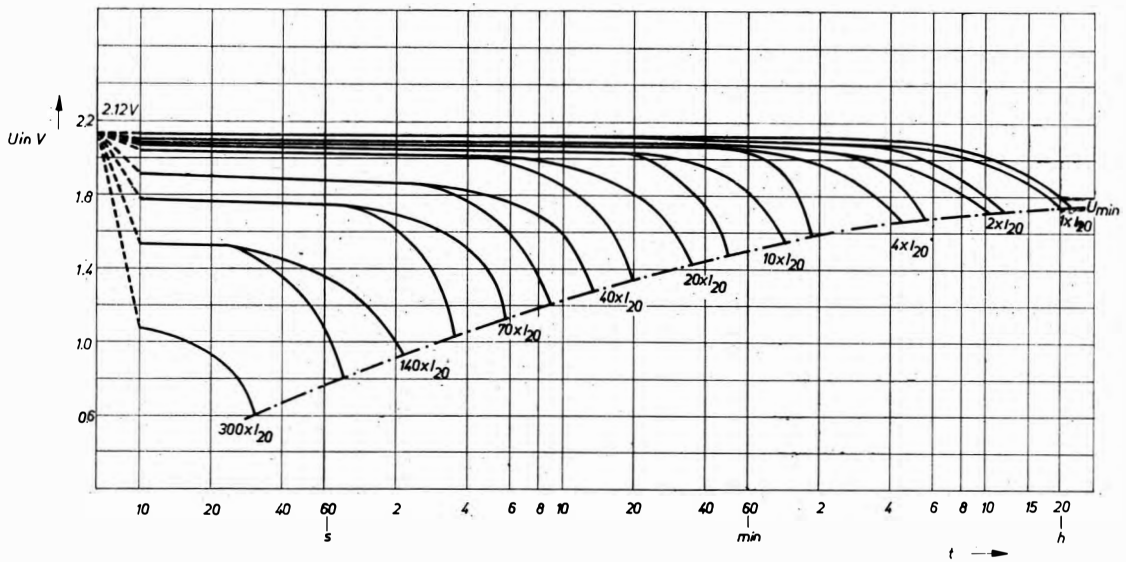


Bild 3.3 Entladekennlinie eines offenen Blei-Akkumulators für verschiedene Belastungen

nehmendem Entladestrom abnimmt. Beträgt sie bei Nennbelastung mit $I_E = 0{,}05 \cdot K_{20}$ noch 1,75 V je Zelle, so sinkt sie bei Belastung mit $I_E = 15 \cdot K_{20}$ auf 0,6 V je Zelle. Dieses Verhalten ist in erster Linie darauf zurückzuführen, daß bei Hochstrombelastung nur die obere Schicht der aktiven Masse auf den Platten umgewandelt wird, die tieferen Schichten aber unberührt bleiben. Das äußert sich auch in einem starken Kapazitätsrückgang bei höheren Belastungen als der Nennbelastung (Bild 3.4). Der Kennlinienverlauf hängt ganz wesentlich von der Konstruktion und vom Zustand der Zelle ab, ist für den Blei-Akkumulator typisch. Dieses Verhalten hat Konsequenzen für die Anwendung.

Man kann den Blei-Akkumulator ohne Nachteil für seine Lebensdauer mit z. B. $I_E = 0{,}1 \cdot K_{20}$ im Dauerbetrieb belasten. In diesem Fall gibt er dann lediglich noch 50%, also die Hälfte seine Nennkapazität, ab. Hat man z. B. für den Akkumulator 6 V/6 Ah bei einer Belastung von $I_E = 3$ A eine theoretische Betriebszeit von 2 Stunden errechnet, so verringert sie sich durch das

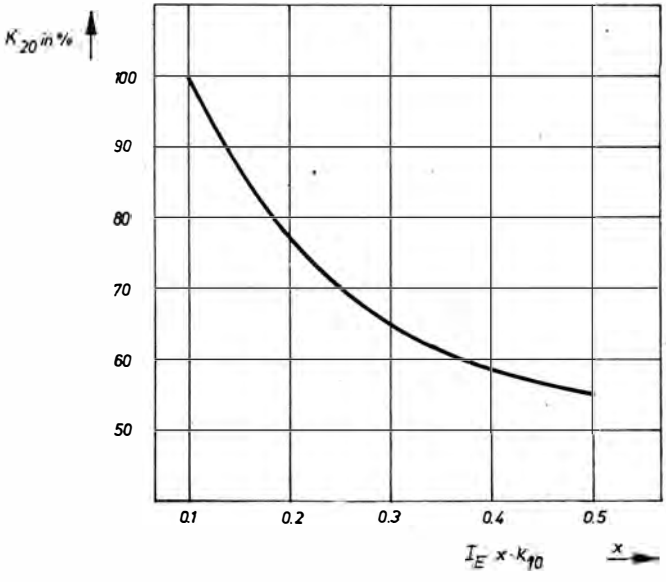


Bild 3.4 Belastungsverhalten der Kapazität des offenen Blei-Akkumulators

belastungsabhängige Verhalten der Kapazität auf etwa 1,5 Stunden, andere betriebszeitmindernde Einflüsse unberücksichtigt. Soll tatsächlich die laut Kapazitätsangabe mögliche Betriebszeit erreicht werden, so darf man den Akkumulator nur mit dem Nennstrom, also $I_E = 0{,}05 \cdot K_{20} = I_{20}$ oder $I_E = 0{,}1 \cdot K_{10} = I_{10}$, belasten und muß die Batteriekapazität entsprechend auslegen.

Für den praktischen Betrieb ist aber auch das Temperaturverhalten entscheidend. Die angegebene Nennkapazität eines Blei-Akkumulators bezieht sich auf die Umgebungstemperatur +20 °C. Bei niedrigeren Temperaturen sinkt die entnehmbare Kapazität wegen der verringerten Leitfähigkeit des Elektrolyten erheblich ab. Dabei gibt es zwar typspezifische Unterschiede, man kann aber ungefähr die Werte nach Tabelle 3.1. ansetzen. Der Elektrolyt des vollgeladenen Blei-Akkumulators (1,28 $g \cdot cm^{-3}$) erstarrt erst bei etwa −70 °C. Der Akkumulator wäre also im Prinzip bis zu dieser Temperatur betriebsfähig. Für den Amateur sind diese tiefen Temperaturen wohl mehr von theoretischem Wert. Von praktischer Bedeutung ist aber, daß der Gefrierpunkt des Elektrolyten mit abnehmender Dichte auch schnell abnimmt. Der Elektrolyt des entladenen Blei-Akkumulators (1,1 $g \cdot cm^{-3}$) gefriert schon bei −10 °C, verbunden mit den Gefahren einfrierenden Wassers (Schäden an den Platten durch Quellen, Platzen des Gefäßes). Also ein Grund mehr, den Akkumulator nicht entladen stehenzulassen.

Tabelle 3.1. beschreibt in etwa auch das Temperaturverhalten des Entladestroms. Der durch den Belastungswiderstand fließende

Tabelle 3.1. Temperaturverhalten der Kapazität eines offenen Blei-Akkumulators

Temperatur in °C	Kapazität in % von K_{20}
−40	40
−30	50
−20	60
−10	70
0	80
+10	90
+20	100

Strom wird wegen des niedrigen Innenwiderstands des Blei-Akkumulators kaum vom Wert bei Normaltemperatur (+20 °C) abweichen, aber die Belastungszeit verringert sich proportional zum temperaturbedingten Kapazitätsrückgang.

Die Entladeschlußspannung des Blei-Akkumulators beträgt bei +20 °C Umgebungstemperatur und Belastung mit $I_E = 0{,}1 \cdot K_{20}$ 1,75 V je Zelle. Dieser Wert sollte im Interesse der Lebensdauer nicht unterschritten werden, da beim Tiefentladen ein verstärkter Verschleiß an den Platten auftritt. Hinzu kommt, daß sich mit Erreichen der Entladeschlußspannung die Kapazität des Akkumulators erschöpft hat. Die dann noch entnommene Kapazität ist minimal und läßt sich wegen der rapide sinkenden Klemmenspannung praktisch nicht mehr nutzen. Bei der Tiefentladung von Batterien besteht außerdem noch die Gefahr des Umpolens einzelner Zellen. Das Umpolen ist mit dem Verlust von aktiver Masse, besonders an der positiven Platte (Schlammbildung), und damit mit dauerndem Kapazitätsverlust verbunden. Tiefentladene Akkumulatoren sollten zur Schonung einem Inbetriebsetzungsladen ($I_L = 0{,}05 \cdot K_{20}$) unterzogen werden. Um das Tiefentladen einzelner Zellen oder Batterien mit Sicherheit zu vermeiden, empfiehlt sich die Anwendung einer Tiefentladungsschutzschaltung (s. Band 3).

Im Abschnitt 3.2.1. wurde auf die starke Selbstentladung des Blei-Akkumulators hingewiesen. Die Selbstentladung hängt von

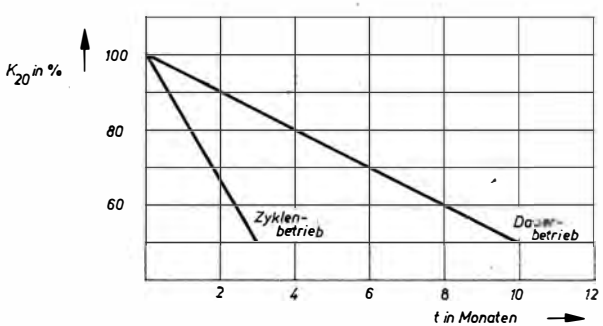


Bild 3.5 Selbstentladung eines offenen Blei-Akkumulators für Zyklenbetrieb und für Dauerbetrieb bei + 20 °C

der Konstruktion und von der Umgebungstemperatur ab. Die Selbstentladung von Akkumulatoren für Zyklen- und für Dauerbetrieb für +20 °C ist in Bild 3.5 dargestellt. Daraus läßt sich ersehen, daß der Kapazitätsverlust durch Selbstentladung proportional zur Zeit ist. Ferner kann man ablesen, daß beim Akkumulator für Zyklenbetrieb nach 3 Monaten etwa 50% der Nennkapazität durch Selbstentladung verlorengegangen sind.

3.2.5. Anwendungstechnische Hinweise

Für die zum Antrieb verwendeten offenen Blei-Akkumulatoren ist ein speziell darauf abgestimmtes Ladegerät am besten geeignet, um die Wartungsvorschriften für das Laden genau einzuhalten. Alle im Abschnitt 1. angeführten Ladearten lassen sich — je nach Aufwand — anwenden. Entsprechende Ladeschaltungen werden im Band 3 vorgestellt. Den geringsten Aufwand erfordert ein Ladegerät für das Laden mit W-Kennlinie (mit Vorwiderstand) bei einer Ladezeit von 9 bis 11 Stunden für 80% einzuladende Kapazität. Kürzere Ladezeiten (8 bis 10 Stunden) erzielt man beim Normalladen mit Konstantstrom. Noch weiter (auf 7 bis 9 Stunden) läßt sich die Ladezeit verringern, wenn mit Ladestromumschaltung (beschleunigt laden bis zum Gasen, dann auf Normalladen umschalten) gearbeitet wird.
Das besondere Merkmal des Blei-Akkumulators besteht darin, daß sich die Klemmenspannung stark in Abhängigkeit vom Ladezustand ändert. Diese Eigenschaft ermöglicht es, den Ladevorgang automatisch zu steuern (spannungsbegrenztes Laden oder Spannungsabschaltung bei Ladeende). Gerade vollautomatische Ladegeräte sichern immer den optimal geladenen Akkumulator und schützen ihn bei vergeßlichen oder zerstreuten Besitzern mit Sicherheit vor dem Überladen und damit vor dem vorzeitigen Ende. Im Interesse der Lebensdauer und somit auch der Sparsamkeit sollte man die in den Abschnitten Laden, Entladen und Wartung gegebenen Hinweise unbedingt beachten. Die Betriebssicherheit und ständige Betriebsbereitschaft des Modells wird dadurch garantiert. Den Wert dieser Empfehlungen erkennt man spätestens dann, wenn der Akkumulator mitten im Wettkampf wegen mangelnder Pflege einmal seinen „Geist" aufgibt. Nicht jeder muß diese Erfahrung unbedingt selbst machen.

Auf das Verhalten des Blei-Akkumulators bei hohen und tiefen Temperaturen wurde im Abschnitt 3.2.4., Entladen, hingewiesen. Anwendungstechnisch sollte man unbedingt auf ausreichende Kühlung und Belüftung des Akkumulators im Modell achten. Die Elektrolyttemperatur darf +50 °C nicht übersteigen.

Bei einwandfreier Wartung ist der Blei-Akkumulator auch mehrere Monate lagerfähig. Wenn der Akkumulator allerdings länger als 3 Monate nicht benutzt wird, dann sollte man eine Außerbetriebsetzung erwägen. Dazu lädt man ihn auf volle Kapazität. Danach wird der Elektrolyt abgegossen und destilliertes Wasser eingefüllt. Dem schließt sich ein 6stündiges Laden mit $I_L = 0{,}03 \cdot K_{20}$ an. Dann gießt man das Wasser ab und füllt neues destilliertes Wasser bis zur Füllstandsmarke bzw. 5 mm über Scheideroberkante ein. Der auf diese Weise vorbereitete Akkumulator kann 1 Jahr ohne Wartung gelagert werden (vor Frost schützen!). Die Wiederinbetriebnahme erfordert ein Inbetriebsetzungsladen wie bei einem neuen Akkumulator.

Die Anwendungsbereiche für den offenen Blei-Akkumulator im Modell sind immer dann gegeben, wenn das Model über eine ausreichende Zuladefähigkeit verfügt. Die hohe Belastbarkeit ermöglicht es, bei dem vergleichbar niedrigen Preis auch leistungsfähige Antriebe aufzubauen. Für Hochleistungsantriebe (Rennboote, E-Flug) ist das Leistungsgewicht des Blei-Akkumulators allerdings zu ungünstig. In der Regel wird man den Antrieb in der Weise auslegen, daß die preisgünstigen Fahrzeugakkumulatoren verwendet werden können (Bild 3.1).

Offene Blei-Akkumulatoren sollten im Modell senkrecht eingebaut und gegen Kippen gesichert werden, damit kein Elektrolyt durch die Verschlußstopfen austreten kann. Gelangt Luftsauerstoff an die aktive Masse der Platten (Kippen der Zellen, Nichteinhalten der Füllstandshöhe), dann treten bleibende Schäden (Ausschlämmen, Kapazitätsverlust) ein. Die Batterie (Zelle) ist sauber- und trockenzuhalten, die Anschlußklemmen sind mit Polfett leicht einzufetten. Im Schiffsmodell schützt man die Batterieoberseite gegen Spritzwasser am besten durch selbstangefertigte Kappen aus Kunststoff (Polystyrol, PVC o. a.), die über den oberen Rand hinwegreichen. Die Batterie wird in eine Wanne aus Kunststoff gesetzt, in der sich unter Umständen ausgetretene Säure sammeln und so nicht das Modell beschädigen kann. Im einfachsten Fall genügt schon eine dichte Plastiktüte, in die man die

Batterie hineinsteckt. Feste und brauchbare Dauerlösungen, die den schnellen Batterieeinbau und -ausbau ermöglichen, sind auf jeden Fall besser. Bei der Befestigung der Batterie im Model dürfen keine mechanischen Spannungen auf das Gehäuse übertragen werden, die eventuell zum Verziehen oder Einreißen führen können.

3.3. Wartungsfreie Blei-Akkumulatoren

3.3.1. Funktion und Aufbau

Die Vielseitigkeit bei der Anwendung wartungsfreier Akkumulatoren in netzunabhängigen elektrischen oder elektronischen Geräten (Film-, Radio-, Fernseh-, Funkgeräte, Filmleuchten, elektromedizinische Geräte, Prüf-, Meßgeräte u. a.) führte zu einem steigenden Bedarf an preiswerten gasdichten Akkumulatoren. Der Blei-Akkumulator bot sich als preisgünstigstes System dafür an. Durch systematische Entwicklungsarbeit wurde dieses leistungsfähige System wartungsfrei gemacht. Der wartungsfreie Blei-Akkumulator ist hoch belastbar, völlig lageunabhängig und über längere Zeiträume lager- und gebrauchsfähig. Es wird das gleiche elektrochemische Prinzip wie beim offenen Blei-Akkumulator angewendet (s. Abschnitt 3.2.1.). Die Zelle ist jedoch mit einer Überdrucksicherung verschlossen. Die Kontrolle des Elektrolyten und das Nachfüllen von destilliertem Wasser entfällt so daß der Akkumulator bis auf das Laden wartungsfrei ist. Je nach Konstruktion der Zelle wird der Elektrolyt in einer Paste (Kaolin oder Kieselsäure plus Schwefelsäure), in einem Vliesscheider oder als Gel festgehalten.

Im Unterschied zum gasdichten Nickel-Kadmium-Akkumulator wurde für den Blei-Akkumulator noch kein brauchbarer Reaktionsmechanismus zum Gasverzehr beim Überladen gefunden. Das bedingt die strikte Einhaltung der Ladevorschrift, es darf also nicht zum Überladen kommen! Beim Überladen würde in der Zelle infolge der Gasentwicklung ein Überdruck entstehen, der das Ventil öffnet. Das Gas entweicht. Das ist gleichbedeutend mit Elektrolytverlust. Bei lang dauerndem Überladen oder mehrmaligem Überladen führt das zum bleibenden Kapazitätsverlust. Diese Eigenschaft schränkt die Funktionsfähigkeit des Systems

Bild 3.6
Gasdichte Blei-Kleinstakkumulatoren 2 V/0,5 Ah und 2 V/0,3 Ah

in keiner Weise ein, sie bedingt nur die genaue Einhaltung der Behandlungsvorschrift.

Wartungsfreie Blei-Akkumulatoren gibt es in unterschiedlichen Ausführungen mit Kapazitäten $K_{20} = (0{,}3 \ldots 36)$ Ah. In der DDR werden z. Z. nur die gasdichten Kleinstakkumulatoren 2 V/0,5 Ah und 2 V/0,3 Ah (Bild 3.6) hergestellt. Ausländische Hersteller produzieren auch Zellen mit größeren Kapazitäten, zum Teil werden die Zellen komplett zu Batterien geschaltet mit 4 V, 6 V und 12 V Klemmenspannung (Bild 3.7) hergestellt. Für die Verwendung der gasdichten Blei-Akkumulatoren ist es wichtig zu wissen, daß unabhängig vom Kapazitätswert alle Typen vergleichbar gute Eigenschaften (Selbstentladung, Lagerfähigkeit, Belastungsfähigkeit, Ladeverhalten u. a.) und daher auch gleiche Behandlungsvorschriften haben.

Bei der Konstruktion der Zellen (Plattenaufbau, Elektrolytzubereitung) richtet man sich nach der Anwendung. Es werden die beiden Typen für

Bild 3.7 Gasdichte Blei-Akkumulatoren 6 V/3 Ah und 2 V/3 Ah

— Dauerbetrieb und
— Zyklenbetrieb
unterschieden, die je nach Hersteller unterschiedliche Typenbezeichnungen haben. Zum Beispiel kann der Kleinstakkumulator 2 V/0,3 Ah nach den Angaben des Herstellers bis zu 100mal aufgeladen werden, dann erst sinkt die nutzbare Kapazität unter 80%. Der Typ 2 V/0,5 Ah dagegen hat bereits nach einigen Ladezyklen die 80-%-Grenze erreicht. Für andere Typen gibt es je nach Hersteller recht unterschiedliche Angaben:
Zyklenbetrieb — etwa 200 bis 400 Zyklen bei Vollentladung,
800 bis 1000 Zyklen bei Teilentladung;
Dauerladen — etwa 4 bis 5 Jahre.
Dabei ist für den Amateur sicher nur der Zyklenbetrieb von Interesse, denn Dauerladen wie beim Bereitschafts-Parallel-Betrieb (Notstromversorgung bei Netzausfall) kommt beim Modellbetrieb kaum vor. Die erforderliche Betriebseigenschaft für den Modellbetrieb läßt sich auf Grund des günstigen Selbstentladeverhaltens auch durch Nachladen in größeren zeitlichen Abständen sichern und erfordert weniger Aufwand. Wichtig für den Amateur ist, daß sich die Zyklenanzahl und damit die Lebensdauer des wartungsfreien Blei-Akkumulators durch Teilentladungen ganz wesentlich (2 bis 4fach) steigern läßt. Ein ähnliches Verhalten weisen auch gasdichte Nickel-Kadmium-Akkumulatoren auf.

3.3.2. Pflege und Wartung

Der Vorzug des wartungsfreien Akkumulators besteht gerade darin, nur ein Minimum an Pflege und praktisch keine Wartung zu erfordern. Die einzigen Pflegemaßnahmen sind das Reinigen des Akkumulators und das Einfetten der Kontakte mit Polfett. Die Wartung beschränkt sich auf regelmäßiges vorschriftsmäßiges Nachladen (s. a. Abschnitt 3.3.3.). Die Zelle soll nicht geöffnet und Elektrolyt nicht nachgefüllt werden. Wenn die Zellen überladen wurden und/oder die Kapazität zu früh absinkt, kann man versuchen, etwas destilliertes Wasser nachzufüllen. Da die Zellen aber meist verschweißt oder vergossen sind, ist ein Öffnen der Zellen oder der Ventile ohne Beschädigung kaum möglich. Außerdem muß die Elektrolytmasse das Wasser aufsaugen.

Pastöse oder gelartige Elektrolyte nehmen aber kaum Wasser auf. Günstiger dagegen sind Typen mit Vliesscheidern, in denen der Elektrolyt durch Kapillarwirkung festgehalten wird.

3.3.3. Laden

In bezug auf das Laden verhält sich der wartungsfreie ganz ähnlich wie der offene Blei-Akkumulator. Die zulässigen Temperaturen für das Laden liegen zwischen 0 °C und +45 °C. Der Verlauf der Klemmenspannung beim Laden läßt beim Ladeende auch wieder einen deutlichen Anstieg erkennen (Bild 3.8). Dieses Verhalten ermöglicht das definierte Abschalten bei Ladeschluß durch einfache elektronische Zusatzgeräte. Da der wartungsfreie Blei-Akkumulator hoch belastbar ist, kann er auch mit hohen Anfangsladeströmen (beschleunigt) geladen werden. Die Hersteller empfehlen im Interesse der Lebensdauer eine strom- und spannungsbegrenzte Lademethode. Wird mit Konstantstrom oder fallendem Strom (W-Kennlinie) geladen, so ist auf jeden Fall beim Erreichen der Gasungsspannung das Laden zu beenden. Die Ladeschlußspannung liegt beim Dauerladen bei 2,25 ... 2,30 V und beim Zyklenbetrieb bei 2,35 V für + 20 °C Umgebungstemperatur. Werden diese Werte überschritten, so ist mit bleibenden Schäden (Aufbauchung, Kapazitätsverlust) an den Zellen zu rechnen.

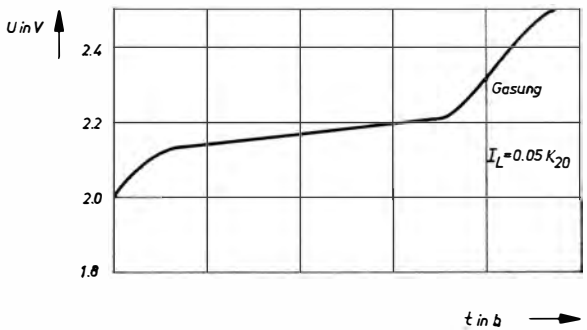


Bild 3.8 Klemmenspannungsverlauf beim Laden eines gasdichten Blei-Akkumulators mit $I_L = 0{,}05 \cdot K_{20}$

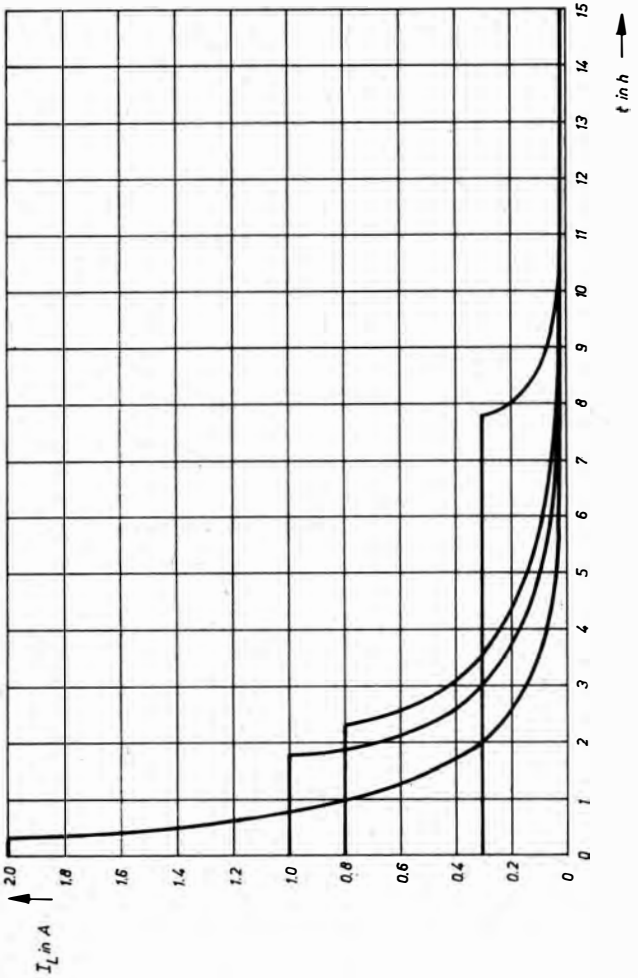


Bild 3.9 Ladestromverlauf bei strombegrenztem Konstantspannungsladen (UI-Kennlinie) des gasdichten Blei-Akkumulators

Das für den Amateur einfachste, anpassungsfähigste und sicher auch preiswerteste Ladeverfahren dürfte das Laden über Vorwiderstand und spannungsbegrenztes Abschalten durch *Schmitt*-Trigger sein (s. Band 3). Wenn man allerdings das Ladegerät auf einen ganz bestimmten Akkumulatortyp abstimmen will, dann ist das Laden nach UI-Kennlinie (s. Band 3) günstiger. Mit diesem Ladegerät lassen sich kurze Ladezeiten bei optimaler Schonung der Zellen und damit auch maximaler Lebensdauer erzielen. Der typische Verlauf des Ladestroms für verschiedene Anfangsladeströme beim strombegrenzten Konstantspannungsladen ist in Bild 3.9 dargestellt. Das Ladegerät wird auf Ladeschlußströme von 1 bis 5 mA je Ah Nennkapazität eingestellt. Dieser Ladeschlußstrom kann als Dauerladestrom fließen, ohne die Zelle(n) zu schädigen, falls man einmal vergessen sollte, den Akkumulator bei Ladeschluß abzuklemmen.
Vor Inbetriebnahme der Zelle oder Batterie ist sie zu reinigen und normal zu laden. Ein besonderes Inbetriebsetzungsladen mit anschließenden Lade-Entlade-Zyklen zur vollen Aktivierung der Zellen entfällt.

Normalladen
Das Normalladen kann man mit einem regelbaren Ladegerät bei erhöhtem Anfangsladestrom durchführen. Für die Lebensdauer ist das Normalladen mit konstantem oder leicht fallendem Ladestrom $I_L = 0{,}1 \cdot K_{20}$ am günstigsten. Beim Erreichen der Gasungsspannung von 2,30 bis 2,35 V je Zelle muß das Laden beendet werden. Automatisches Abschalten gewährleistet das 100%ige Laden der Zelle(n) und bietet die notwendige Sicherheit. Kleinere Ladeströme für das Normalladen ($I_L = 0{,}05 \cdot K_{20}$) wirken sich positiv auf die Lebensdauer aus, verlängern aber den Ladevorgang. Letzteres wird für die Zellen 2 V/0,3 Ah und 2 V/0,5 Ah empfohlen.

Dauerladen
Das Dauerladen der gasdichten Blei-Akkumulatoren ist möglich. Die Typen für Dauerladung sind speziell dafür konstruiert. Das Dauerladen deckt nur die durch Selbstentladung entstehenden Kapazitätsverluste. Der Dauerladestrom beträgt in der Regel 1 bis 5 mA je Ah Nennkapazität. Bei Akkumulatortypen mit erhöhter Selbstentladung kann er sogar bis 30 mA je Ah betragen.

Auf jeden Fall ist die Klemmenspannung beim Dauerladen auf 2,25 bis 2,30 V je Zelle zu begrenzen.

3.3.4. Entladen

Um das Sulfatisieren der Platten zu vermeiden, ist der wartungsfreie Blei-Akkumulator immer im geladenen Zustand aufzubewahren. Daher sollte man sich im Interesse der Lebensdauer zur Regel machen: „Nach jedem Entladen wird sofort wieder geladen!"

Die zulässigen Temperaturen für das Entladen liegen zwischen −20 °C und +45 °C. Besonderes Merkmal auch des wartungsfreien Blei-Akkumulators ist dessen hohe Belastbarkeit. Zum Beispiel können Zellen mit $K_{20} = 1{,}8$ Ah bis $I_E = 15 \cdot K_{20}$ und Zellen mit $K_{20} = 12$ Ah noch bis $I_E = 7 \cdot K_{20}$ belastet werden. Daß die Zellen selbst bei hohen Belastungen noch eine sehr gute Spannungslage aufweisen, läßt sich aus dem Verlauf der Kennlinien (Bild 3.10) erkennen. Aus dem Diagramm ist ferner abzulesen, wie lange eine Zelle belastet werden kann und wie sich die Entladeschlußspannung in Abhängigkeit von der Belastung ändert.

Wie auch bei anderen Akkumulatoren sinkt die entnehmbare Kapazität sehr stark mit steigendem Entladestrom (Bild 3.11). Dieses Verhalten ist nicht nur auf die Verluste am inneren Widerstand der Zelle, sondern auch auf chemische Vorgänge zurückzuführen. Bei Hochstromentladungen werden nur die oberen

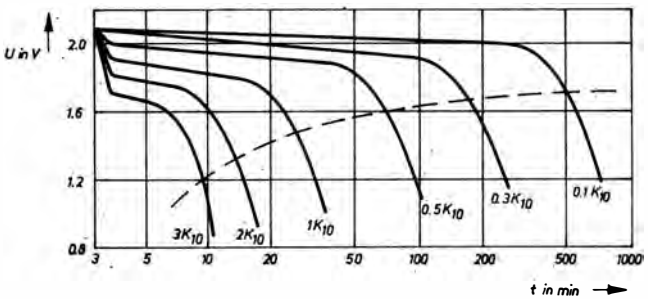


Bild 3.10 Entladekennlinie eines gasdichten Blei-Akkumulators

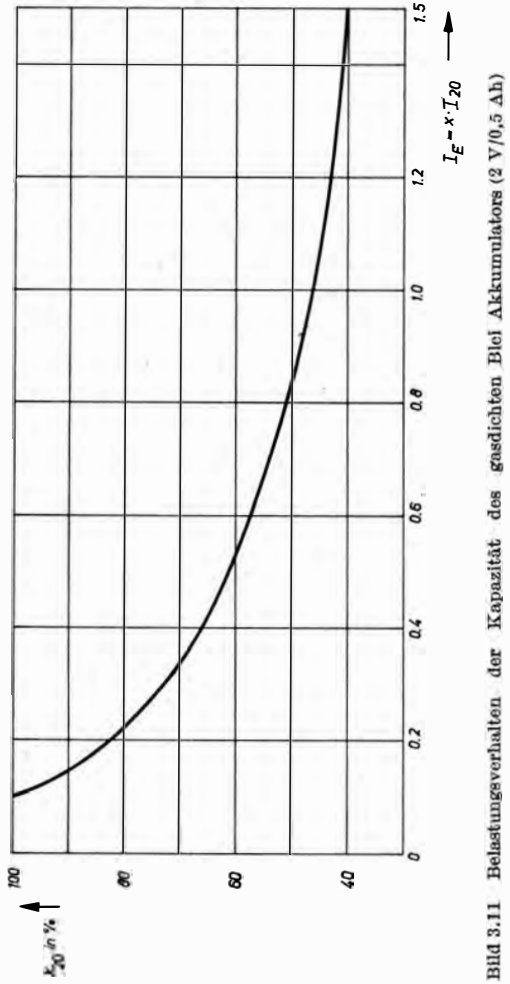


Bild 3.11 Belastungsverhalten der Kapazität des gasdichten Blei Akkumulators (2 V/0,5 Ah)

Schichten der aktiven Masse umgewandelt, die tieferen bleiben davon unberührt und tragen somit nicht zur nutzbaren Kapazität bei.

Belastungsstrom und Kapazität der Zelle hängen stark von der

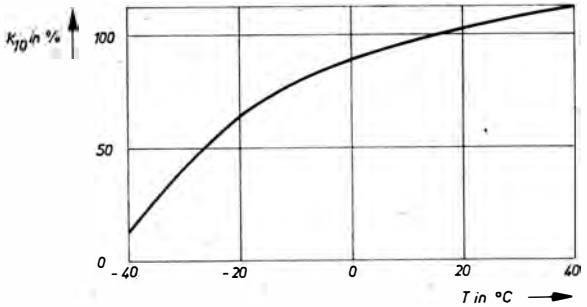


Bild 3.12 Temperaturverhalten der Kapazität des gasdichten Blei-Akkumulators (2 V/0,5 Ah)

Umgebungstemperatur ab. Der wartungsfreie Blei-Akkumulator ist zwar bei −20 °C noch betriebsfähig, hat dann aber nur noch etwa 50% der Nennkapazität (Bild 3.12). Die mittlere Entladespannung einer Zelle des wartungsfreien Blei-Akkumulators beträgt $U_Z = 2$ V, die Entladeschlußspannung für +20 °C und $I_E = 0{,}1 \cdot K_{20}$ $U_{ZES} = 1{,}75$ V. Dieser Wert soll mit Rücksicht auf die Lebensdauer nicht unterschritten werden. Tiefentladen bringt keinen Kapazitätsgewinn. Wartungsfreie Blei-Akkumulatoren sind tiefentladesicher. Das bedeutet, ein Akkumulator, der versehentlich tiefentladen (Gerät bzw. Antrieb wurde nicht abgeschaltet) wurde, läßt sich wieder bis zur Nennkapazität aufladen. Bei Tiefentladung können zum Abbau des erhöhten Innenwiderstands einige Stunden Anfangsladeströme in der Größenordnung einiger Milliampere fließen, die dann erst den Nennwert erreichen. Eine tiefentladene Zelle/Batterie benötigt einige Lade-Entlade-Zyklen, um wieder die volle Kapazität zu erlangen. Das setzt aber voraus, daß zwischen Tiefentladung und Laden nicht mehr als etwa 4 Wochen gelegen haben, sonst ist mit einem Kapazitätsverlust zu rechnen. Es empfiehlt sich also auch für den wartungsfreien Blei-Akkumulator zur Vermeidung unnötiger Arbeiten und Kosten die Verwendung eines Tiefentladungsschutzschalters (s. Band 3).

Wartungsfreie Blei-Akkumulatoren haben ein günstiges Ladeverhalten und weisen nur geringe Selbstentladung auf. Diese positive Eigenschaft verringert nicht nur den Wartungsaufwand (Nach-

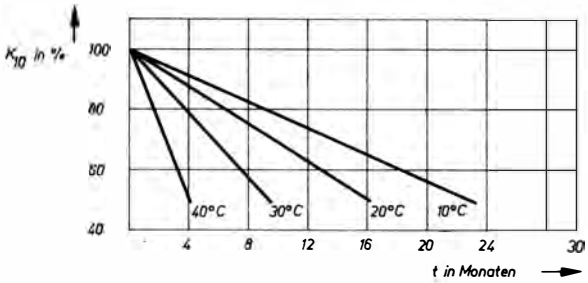


Bild 3.13 Abhängigkeit der Selbstentladung von der Lagerzeit und der Umgebungstemperatur des gasdichten Blei-Akkumulators (2 V/0,5 Ah)

laden), sondern bietet auch anwendungstechnische Vorteile. Dabei haben alle Typen wartungsfreier Blei-Akkumulatoren ein ähnlich gutes Verhalten. Die Selbstentladung ist wie auch bei anderen Akkumulatoren stark temperaturabhängig (Bild 3.13). Bei normaler Umgebungstemperatur (+ 20 °C) stehen selbst nach 18 Monaten Lagerzeit noch etwa 50 % der Kapazität zur Verfügung. Bei Temperaturen unter 0 °C kommt die Selbstentladung fast zum Stillstand.

3.3.5. Anwendungstechnische Hinweise

Der wartungsfreie Blei-Akkumulator bietet neben dem günstigen Preis auch einige wesentliche anwendungstechnische Vorteile für den Modellantrieb. Der Preisvorteil des Blei-Akkumulators kommt aber nur bei Einhaltung der Ladevorschriften voll zum Tragen. Durch den Aufbau eines regelbaren Ladegeräts (s. Band 3), das auf den spezifischen Kennlinienverlauf des Blei-Akkumulators abgestimmt ist, schafft man eine Voraussetzung für richtiges Laden. Die Ladetechnik ist die eine, das Laden nach dem Entladen die andere Voraussetzung.
Für die Anwendung des wartungsfreien Blei-Akkumulators gelten folgende Temperaturbereiche:

— Laden 0 °C bis +45 °C,
— Entladen −20 °C bis +45 °C,
— Lagern −30 °C bis +45 °C.

Die entnehmbare Kapazität und die Spannungslage sind stark temperaturabhängig. Da die Blei-Akkumulatoren nur eine geringe Selbstentladung aufweisen, genügt ein Nachladen alle 6 Monate. Niedrige Temperaturen verringern die Selbstentladung erheblich. Werden diese Hinweise beachtet, so hat man mit dem wartungsfreien Blei-Akkumulator nicht nur eine preiswerte, sondern auch zuverlässige Spannungsquelle für den Modellantrieb.

Man wird diesen Akkumulatortyp immer dann verwenden, wenn das Modell entsprechend zuladefähig ist und keine hohen Geschwindigkeiten verlangt werden. Das trifft vor allem für vorbildgetreue Funktions- und Fahrmodelle (Auto, Schiff) zu. Anwendungstechnisch ist dabei von besonderem Vorteil, daß der wartungsfreie Blei-Akkumulator in beliebiger Lage eingebaut werden kann. Beim Einbau im Modell muß allerdings auf ausreichende Kühlung, auch unter erschwerten Betriebsbedingungen, geachtet werden, damit die maximale Betriebstemperatur von +45 °C nicht überschritten wird. Abgestufte Typenreihen ermöglichen die genaue Anpassung der Batteriekapazität an die anwendungstechnischen Bedingungen. Für den Amateur ist dabei von Vorteil, daß einige Batterien die äußeren Abmessungen von Batterien aus Kohle-Zink-Elementen der Typen R 14 und R 20 haben. Damit läßt sich z. B. ein Batteriesatz aus 4 Monozellen ohne weiteres austauschen (Bild 3.14). Da beide Batteriesätze die gleiche Klemmenspannung von 6 V aufweisen, besteht auch von dieser Seite her keine Einschränkung gegen den Austausch. Es muß lediglich das Batteriefach im Modell entsprechend ausgelegt sein.

Bild 3.14
Der gasdichte Blei-Akkumulator 3 WFZ 3 (6 V/3 Ah) ist austauschbar gegen 4 Monozellen (R 20)

4. Nickel-Kadmium-Akkumulatoren

4.1. Allgemeines

Der Nickel-Kadmium-Akkumulator, auch unter der Bezeichnung „Stahl-Akkumulator" bekannt, arbeitet mit einem alkalischen Elektrolyten. Ihn gibt es seit der Jahrhundertwende, als von der Industrie kleine, leichte und robuste Spannungsquellen gefordert wurden. *Edison* entwickelte den Nickel-Eisen-Akkumulator in erster Linie für den Einsatz im Eisenbahnwesen und *Jungner* den Nickel-Kadmium-Akkumulator. Durch intensive Arbeiten wurden diese beiden Systeme bis etwa 1910 so weit verbessert, daß die damals konstruierten Zellen auch heute noch in fast unveränderter Form produziert werden. Die Entwicklung der Sinterplatte durch deutsche Forscher in den dreißiger Jahren brachte wesentliche Fortschritte bei der Belastungsfähigkeit des Nickel-Kadmium-Akkumulators. Die Gebrauchseigenschaften wurden durch die gasdichten Systeme weiter verbessert, auf die die deutschen Erfinder, *A. E. Lange*, *E. Langguth*, *E. Breuning* und *A. Daßler* 1933 ein Patent erhielten. Der gasdichte Nickel-Kadmium-Akkumulator mit Sinterfolienplatten kommt dem idealen Akkumulator schon recht nahe. Er zeichnet sich durch folgende Eigenschaften aus:

— Lange Lebensdauer (1000 bis 2000 Ladezyklen),
— Dauerladefähigkeit,
— sehr hohe Stromabgabe,
— unabhängig von der Einbaulage (gasdicht),
— wartungsfrei,
— schnelladefähig,
— auch bei hohen Temperaturen zuverlässig,
— gutes Tieftemperaturverhalten.
— lange Lagerfähigkeit (geladen oder ungeladen),
— mechanisch robust,
— gute (flache) Spannungslage bei der Entladung.

Zusammen mit dem im Vergleich zum Blei-Akkumulator günstigeren Leistungsgewicht sind es gerade diese Eigenschaften, die dem Nickel-Kadmium-Akkumulator neue Anwendungsbereiche bei

Hochleistungsantrieben von Modellen erschlossen. Durch die Herstellung hoher Stückzahlen und die Anwendung rationeller Technologien konnte der Stückpreis der Zellen so weit gesenkt werden, daß der Nickel-Kadmium-Akkumulator auch für den „Normalantrieb" erschwinglich wurde. Beide Typen, der offene und der gasdichte Nickel-Kadmium-Akkumulator, werden für den Modellantrieb verwendet.

4.2. Offene Nickel-Kadmium-Akkumulatoren

4.2.1. Funktion und Aufbau

Die elektrochemischen Vorgänge im Nickel-Kadmium-Akkumulator werden durch die Gleichung

$$\underset{\text{negative Elektrode}}{Cd} + 2\,\underset{\text{positive Elektrode}}{Ni(OH)_3} \underset{\text{Entladen}}{\overset{\text{Laden}}{\rightleftharpoons}} \underset{\text{negative Elektrode}}{Cd(OH)_2} + 2\,\underset{\text{positive Elektrode}}{Ni(OH)_2}$$

beschrieben. Als Elektrolyt dient die wäßrige Lösung von Kaliumhydroxid (KOH) mit der Dichte 1,19 $g \cdot cm^{-3}$ bei +20 °C. Der Elektrolyt hat die Aufgabe der Ionenleitung zwischen den Elektroden, chemisch wird er dabei nicht verändert. Da sich die Dichte des Elektrolyten beim Laden oder Entladen nicht verändert, kann sie nicht wie bei Blei-Akkumulatoren als Merkmal für den Ladezustand dienen. Die Elektrolytdichte ist zur Erzielung eines geringen Innenwiderstands und damit auch geringer elektrischer Verluste optimiert. Für den Betrieb bei tiefen oder hohen Temperaturen werden andere Elektrolytdichten angegeben. Zur Erhöhung der Lebensdauer und zur Verringerung des Innenwiderstands wird dem Elektrolyten Lithiumhydroxid beigemischt. Der Lithiumgehalt hängt von der Bauart des Akkumulators ab, so daß hier die Angaben des Herstellers zu beachten sind.
Kaliumhydroxid (Kalilauge) hat die Eigenschaft, Kohlendioxid aus der Luft unter Bildung von Kaliumkarbonat zu binden. Durch die Karbonatbildung verschlechtert sich die Leitfähigkeit des Elektrolyten, so daß dieser von Zeit zu Zeit erneuert werden muß.

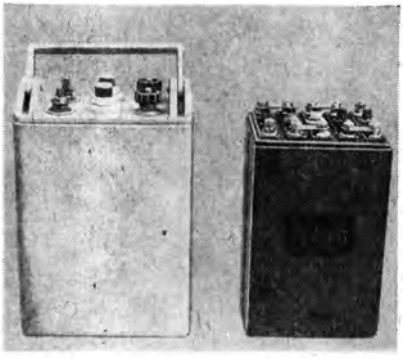


Bild 4.1
Bauformen offener Nickel-Kadmium-Akkumulatoren (2,4 V/25 Ah; 6 V/8 Ah)

Der offene Nickel-Kadmium-Akkumulator wird in der DDR in den Formen mit Kunststoffgehäuse mit der Nennkapazität $K_5 = (4 \ldots 16)$ Ah und mit Stahlblechgehäuse mit der Nennkapazität $K_5 = (30 \ldots 750)$ Ah hergestellt (Bild 4.1). Der Akkumulator im Kunststoffgehäuse ist mit einem Schraubverschluß zum Einfüllen der Kalilauge versehen. Er dient gleichzeitig als Ventil zum Entgasen und verhindert das Austreten von Elektrolytflüssigkeit. Die Akkumulatoren im Stahlblechgehäuse sind mit einem Kugelfüllverschluß ausgestattet, der ebenfalls zur Entgasung dient und das Austreten des Elektrolyten wirksam verhindert. Diese Zellen können bei einer Schräglage bis 22° dauernd und bis 45° kurzzeitig betrieben werden. Die Ventile öffnen bereits bei geringen Drücken $(0{,}1 \ldots 0{,}7) \cdot 10^{-5}$ N/m³ (0,1 bis 0,7 bar), so daß sich kein wesentlicher Überdruck in den Zellen aufbauen kann. Die Ventile haben außerdem die Aufgabe, den Eintritt von Luft in die Zelle und damit die Karbonatbildung zu verhindern.

Bei offenen Nickel-Kadmium-Akkumulatoren mit Taschenzellen ist meist nur der negative Plattensatz isoliert herausgeführt, während der positive Pol am Zellengefäß liegt. Das muß man beim Zusammenbau von Zellen zu Batterien beachten. Die Zellengehäuse müssen gegeneinander isoliert werden, um Kurzschlüsse zu vermeiden. Die positiven sind von den negativen Platten durch Scheider aus isolierendem Kunststoff (Hartgummi, PVC, Dederon o. a.) getrennt. Diese Scheider werden in Form von gerippten perforierten Platten oder als Gewebe eingesetzt. Gewebescheider

ermöglichen einen geringen Plattenabstand und damit auch einen geringen Innenwiderstand der Zelle. Meist begrenzt die Temperaturbeständigkeit des Scheiders die zulässige Betriebstemperatur des Nickel-Kadmium-Akkumulators nach oben. Hinzu kommt, daß bei höheren Temperaturen die Nickeloxide zunehmend unstabil werden. Ein ständiger Betrieb bei höheren Temperaturen führt daher zu bleibenden Kapazitätsminderungen.
Bei Röhrchen- und Sinterzellen sind dauernde Betriebstemperaturen bis +45 °C zulässig. Taschenzellen sollten nicht wärmer als +35 °C werden, da oberhalb +35 °C eine verstärkte Oxydation des Graphits einsetzt, die zur beschleunigten Anreicherung des Elektrolyten mit Kaliumkarbonat führt. Die untere Temperaturgrenze für die Betriebsfähigkeit des Akkumulators ist durch die mit sinkender Temperatur abnehmende Leitfähigkeit des Elektrolyten gegeben. Der Betrieb unter 0 °C führt nur zu vorübergehendem Kapazitätsverlust. Ab −20 °C beginnt der Elektrolyt zu erstarren und hat bei −70 °C eine feste Konsistenz. Damit ist der Akkumulator nicht mehr betriebsfähig. Für den ständigen Betrieb bei Temperaturen unter −20 °C muß die Elektrolytdichte erhöht werden. Obere und untere Temperaturgrenze hängen also von der Bauart und der Dichte des Elektrolyten ab. Diesbezüglich sind die Angaben der Hersteller zu beachten.

4.2.2. Pflege und Wartung

Besonderes Kennzeichen des Nickel-Kadmium-Akkumulators ist seine lange Lebensdauer bei mechanischer und elektrischer Robustheit und Anspruchslosigkeit. Soll er aber über mehrere Jahre im Modell störungsfrei arbeiten, so ist doch ein Mindestmaß an Pflege und Wartung erforderlich.

Pflege
Hat man den Akkumulator neu erworben, so säubert man ihn zunächst vom Schmutz und Verpackungsmittelresten. Dann werden die Polverbinder auf festen und ordnungsgemäßen Sitz geprüft und die Kontakte leicht mit Polfett oder Vaseline (säurefreies Fett) eingefettet. Man kontrolliert den Laugenstand und füllt auf die vorgeschriebene Höhe (mit Lauge der Dichte 1,19 bis 1,21 $g \cdot cm^{-3}$) nach. Verschüttete Lauge wäscht man mit war-

mem Wasser ab, das dabei aber nicht in das Zelleninnere gelangen darf. Da die Poldichtungen in der Regel nicht so dicht sind, daß doch geringe Mengen Kalilauge durchkriechen können, müssen die dadurch entstehenden Ausblühungen an den Polen ebenfalls von Zeit zu Zeit abgewaschen werden. Die blanken Batterieteile sind nach jeder Reinigung gründlich zu trocknen und leicht mit säurefreiem Fett einzufetten. Diese Pflegearbeiten werden in der Regel einmal jährlich bzw. bei Inbetriebsetzung ausgeführt.

Wartung

Für die Wartung von offenen Nickel-Kadmium-Akkumulatoren gibt der Hersteller in der DDR, das *Kombinat VEB Galvanische Elemente, Betrieb Zwickau*, folgende Hinweise [9]:

— „Das Füllen der Zellen ist mit Akkumulatoren-Kalilauge der nach *TGL 200-4593* entsprechenden Reinheit mit einer Dichte von 1,19 bis 1,21 g/cm³, gemessen bei +20 °C, mit einem Zusatz von 8 g $LiOH \cdot H_2O$/l, vorzunehmen. Eine abweichende Elektrolytdichte hat einen schädigenden Einfluß. Die Kontrolle der Dichte der Akkumulatoren-Kalilauge ist mit einer Spindel (Aräometer) durchzuführen. Diese Messungen sollen möglichst im entladenen Zustand, niemals aber unmittelbar nach dem Laden der Batterien vorgenommen werden. Die Dichte der alkalischen Elektrolyten ist kein Maßstab für den Ladezustand der Zellen. Der Elektrolytstand in den Zellen ist nach der mitgelieferten Typenkarte bzw. dem Typenschild einzuhalten, damit nicht bei zu niedrigem Elektrolytstand die Luft auf die Platten für längere Zeit schädigend einwirkt oder ein zu hoher Elektrolytstand ein Austreten des Elektrolyten und damit Kriechströme und Korrosionen an den Zellen verursacht.

— Werden Zellen bei extremen Plus- und Minustemperaturen betrieben, ist folgendes zu beachten:

- Bei Temperaturen unter −20 °C empfiehlt es sich, Akkumulatoren-Kalilauge mit der nach *TGL 200-4593* entsprechenden Reinheit mit einer Dichte von 1,27 ± 0,01 g/cm³, gemessen bei +20 °C, als Elektrolyt zu verwenden. Auf diese Weise wird die Funktionssicherheit der Zellen erhöht.
- Werden die Zellen bei Temperaturen über +35 °C längere Zeit betrieben, empfiehlt es sich, Akkumulatoren-Kalilauge mit der nach *TGL 200-4593* entsprechenden Reinheit mit

einer Dichte von 1,14 ± 0,01 g/cm³, gemessen bei +20 °C, mit einem Zusatz von 8 g $LiOH \cdot H_2O$/l, als Elektrolyt zu verwenden. Dadurch wird die Lebensdauer der Zellen vorteilhaft beeinflußt.

— Die laufende Regulierung des Elektrolytstands und der Elektrolytdichte soll mit destilliertem Wasser bzw. stark verdünnter Kalilauge mit einer Dichte von etwa 1,02 g/cm³ erfolgen. Nur wenn Akkumulatoren-Kalilauge verschüttet wurde oder beim Laden ausgetreten ist, wird Akkumulatoren-Kalilauge nachgefüllt. Liegt die Dichte in den Zellen unter 1,19 g/cm³, so ist ein Elektrolytwechsel vorzunehmen.

— Die Akkumulatoren-Kalilauge ist mindestens alle 18 Monate zu erneuern oder auch früher, wenn der Karbonatgehalt über 30 g/l liegt.

Vor dem Elektrolytwechsel sind die Akkumulatoren bis auf 0 V je Zelle zu entladen, dann zu entleeren und mit destilliertem Wasser von mindestens Zimmertemperatur gründlich auszuspülen. Nach vollständigem Leeren sind die Zellen sofort mit neuer Kalilauge, bei der die Dichte 0,01 bis 0,02 g/cm³ größer sein muß, da eine Verdünnung durch das in den Platten noch vorhandene Wasser erfolgt, zu füllen und zu verschließen. Anschließend ist ein Ausgleichsladen vorzunehmen.

— Es ist wichtig, daß die Lager- und Transportgefäße für Akkumulatoren-Kalilauge stets gut verschlossen gehalten werden, damit die Akkumulatoren-Kalilauge durch Aufnahme von Kohlendioxyd aus der Luft (Karbonatbildung) nicht unbrauchbar gemacht wird. Niemals darf Schwefelsäure, Leitungswasser oder angesäuertes Wasser zum Füllen der Zellen verwendet werden. Werkzeuge, Behälter und Gefäße, die zur Wartung von Blei-Batterien in Gebrauch sind, dürfen nicht für Nickel-Kadmium-Akkumulatoren benutzt werden. Blei- und Nickel-Kadmium-Akkumulatoren dürfen nicht im selben Raum geladen oder betrieben werden.

— Es ist notwendig, daß die Zellendeckel, Polbolzen und Zellenverbinder immer sauber- und trockengehalten und Wasser oder übergelaufene Akkumulatoren-Kalilauge beseitigt werden. Da die Akkumulatoren-Kalilauge begierig Kohlendioxid aus der Luft aufnimmt, entsteht Kaliumkarbonat, das auf den Zellen und besonders auf den Verschlüssen zu Verkrustungen führt. Die Krusten lassen sich am einfachsten dadurch ent-

fernen, daß die Zellen bzw. Verschlüsse mit warmem Wasser abgewaschen und danach getrocknet werden, wobei kein Wasser in die Zellen gelangen darf. Die blanken Batterieteile sind nach jeder Reinigung mit einem säurefreien Fett leicht einzufetten. Bei Beanstandungen sind die Akkumulatoren in dem jeweiligen Betriebszustand mit der darin enthaltenen Akkumulatoren-Kalilauge an das Herstellerwerk einzuschikken.

— Bei der vierteljährlich durchzuführenden Ausgleichsladung ist gleichzeitig eine Überprüfung sämtlicher Schraubverbindungen (z. B. Zellenverbinder, Kabel) mit durchzuführen.

Vorsichtsmaßregeln

Akkumulatoren-Kalilauge ist ätzend! Arbeitsschutzbestimmungen beachten! Mit Akkumulatoren-Kalilauge benetzte Handflächen sind sofort mit verdünnter Essigsäure (1:6) abzuwaschen. Bei Augenverletzungen ist sofort 3%iges Borwasser zu verwenden."

4.2.3. Laden

Zum Laden des offenen Nickel-Kadmium-Akkumulators lassen sich alle im Abschnitt 1. erläuterten Ladearten anwenden. Beim Konstantspannungsladen muß allerdings der Anfangsladestrom begrenzt werden. Die für den Modellbauer wohl praktikabelste und zugleich auch preiswerteste Ladeart dürfte das Laden mit

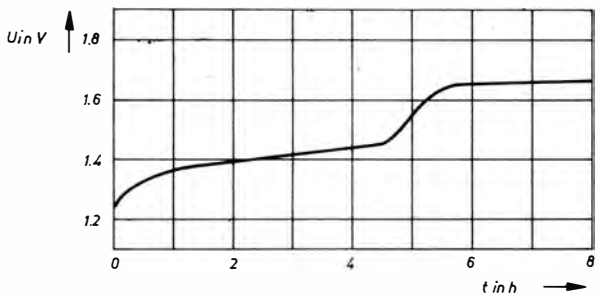


Bild 4.2 Ladekennlinie des offenen Nickel-Kadmium-Akkumulators für 7stündiges Normalladen mit $I_L = 0{,}2 \cdot K_5$

Tabelle 4.1. Ladeschlußspannung und Ladezeit von offenen Nickel-Kadmium-Akkumulatoren (für +20 °C, Elektrolytdichte 1,2 g · cm^{-3})

Zellenart	Uo in V	Ladezeit in h für $I_L = 0{,}2 \cdot K_5$
Röhrchenzelle	1,67	7
Taschenzelle	1,60	7
Sinterzelle	1,50	6

Vorwiderstand und spannungsbegrenztem Abschalten sein. Die Anwendung dieser Ladeart wird durch den typischen Verlauf der Ladekennlinie des offenen Nickel-Kadmium-Akkumulators begünstigt (Bild 4.2.). Die Spannungsabschaltung stellt man auf die Werte nach Tabelle 4.1. ein. Aus dieser Tabelle ist auch zu ersehen, daß Sinterzellen einen höheren Wirkungsgrad haben, sie erreichen die Volladung schon nach 6 Stunden. Beim Laden des offenen Nickel-Kadmium-Akkumulators bleiben die Füllverschlüsse geschlossen, um das Eindringen von Luft (Karbonatisierung) und zu starkes Verdunsten von Wasser zu verhindern. Beim Laden der Typen mit Plastgehäuse sind die Verschlüsse nur zu lockern. Das Laden soll mit möglichst konstantem Strom $I_L = 0{,}2 \cdot K_5$ geschehen. Der Ladevorgang kann ohne Schädigung des Akkumulators auch bei Teilladung abgebrochen bzw. nach Unterbrechung fortgesetzt werden. Dauerndes Überladen und Elektrolyttemperaturen über +35 °C sind zu vermeiden.

Beim Nickel-Kadmium-Akkumulator beginnt die Sauerstoffentwicklung an der positiven Elektrode bereits etwa nach der halben Ladung (Kennlinienknick). Die Wasserstoffentwicklung an der Kadmium- (negativen) Elektrode setzt praktisch erst bei Volladung ein.

Folgende Lademethoden sind geeignet:

— Normalladen
  Normalladen bedeutet 7 bis 8 Stunden Laden mit Konstantstrom $I_L = 0{,}2 \cdot K_5$. Die geladen gelieferte Batterie oder Zelle wird zur Inbetriebsetzung einmal normalgeladen.
— Ausgleichsladen
  Beim Ausgleichsladen wird mit Konstantstrom $I_L = 0{,}2 \cdot K_5$ die doppelte Zeit (14 bis 16 Stunden) geladen. Ausgleichsladen

ist für Zellen oder Batterien vorgesehen, die in der Kapazität abgefallen sind, und nach Laugewechsel.

— Erhaltungs- bzw. Dauerladen
Erhaltungs- bzw. Dauerladen mit $I_L = (0{,}002 \ldots 0{,}001) \cdot K_5$ zur Sicherung der dauernden Betriebsbereitschaft ist möglich, wird aber nicht für längere Zeiträume (mehrere Wochen) empfohlen. Dauerladen kann nur bei Taschen- und Sinterzellen angewendet werden. Die Ladespannung je Zelle beträgt:
Taschenzelle = (1,45 ... 1,50) V,
Sinterzelle = (1,36 ... 1,38) V.

Das Arbeiten mit konstantem Erhaltungsladestrom ist günstiger, da die mittlere Ladespannung je Zelle je nach Alter und Bauart von den angegebenen Werten abweichen kann. Hinzu kommt, daß der Temperaturkoeffizient negativ ist und (2,7 ... 3) mV/K beträgt. Wird ein reines Erhaltungsladen durchgeführt, so ist halbjährlich ein Ausgleichsladen vorzunehmen, da sonst ein bleibender Kapazitätsverlust eintritt.

4.2.4. Entladen

Ein wesentlicher Vorteil des Nickel-Kadmium-Akkumulators besteht in seiner Robustheit im Entladebetrieb. Um aber die hohe mögliche Zyklenanzahl bzw. Lebensdauer auch tatsächlich zu erreichen, sind einige Dinge unbedingt zu beachten. Im Unterschied zum Blei-Akkumulator kann der Nickel-Kadmium-Akkumulator ohne Nachteil für seine Funktion oder Lebensdauer in jedem Ladezustand, auch völlig entladen, beliebig lange unbenutzt bleiben. Die einzige Bedingung ist, daß die vorgeschriebene Füllhöhe der Kalilauge eingehalten wird.

Der maximale Entladestrom hängt vom Innenwiderstand der Zellen und damit von deren Bauart ab. Taschenzellen sollen möglichst mit dem Nennstrom $I_E = 0{,}2 \cdot K_5$ entladen werden. Für diese Zelle ist ein maximaler Dauerentladestrom von $I_{Emax} = 0{,}3 \cdot K_5$ für 3stündiges Entladen bei Verringerung der Kapazität zulässig (Bild 4.3). Größere Dauerentladeströme verringern die Lebensdauer der Zellen. Bei kurzzeitigen Belastungen sind höhere Entladestromstärken als $I_E = 0{,}3 \cdot K_5$ statthaft, allerdings empfehlen die Hersteller für diese Anwendung Rückfragen bei ihnen. Nickel-Kadmium-Akkumulatoren mit Sinterzellen lassen sich

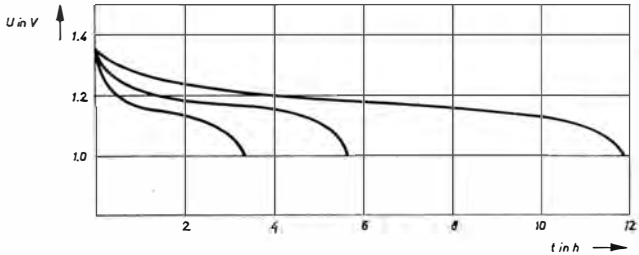


Bild 4.3 Entladekennlinie des offenen Nickel-Kadmium-Akkumulators mit Taschenzelle. a — 10stündig ($I_E = 0{,}1 \cdot K_5$); b — 5stündig ($I_E = 0{,}2 \cdot K_5$); c — 3stündig ($I_E = 0{,}3 \cdot K_5$)

wegen des wesentlich geringeren Innenwiderstands auch höher belasten (kurzzeitig und dauernd). Die mittlere Entladespannung der Nickel-Kadmium-Zelle bei Belastung mit $I_E = 0{,}2 \cdot K_5$ beträgt $U_Z = 1{,}2$ V, die Entladeschlußspannung für die gleiche Belastung $U_{ZES} = 1$ V.

Einzelne Zellen können, ohne Schaden zu nehmen, bis zur Klemmenspannung 0 V entladen werden. Bei der Zusammenschaltung von Zellen zu einer Batterie ist das allerdings etwas anders. Auf Grund der schon bei neuen Zellen vorhandenen geringfügigen oder aber durch den Betrieb entstandenen Kapazitätsunterschiede zwischen den Zellen, erreicht (erreichen) eine (mehrere) Zelle(n) eher als die restlichen den Ladezustand $K_5 = 0$. Entlädt man die Batterie weiter, so werden die Zellen mit $K_5 = 0$ umgepolt und nehmen dabei Schaden. Durch einmaliges Umpolen mit anschließendem Normalladen läßt sich der Schaden wieder beseitigen. Mehrmaliges Umpolen führt aber zu bleibenden Schäden an den betroffenen Zellen. Um das Umpolen zu vermeiden, ist beim Nickel-Kadmium-Akkumulator folgende Regel einzuhalten:

- Das Entladen einer Batterie wird beendet, wenn die Klemmenspannung bei Belastung den Wert $U_{ZES} = 1$ V erreicht hat.
- Um das Abfallen (Kapazitätsminderung) einzelner Zellen rechtzeitig zu erkennen, sollten nicht mehr als 10 Zellen zu Batterien zusammengeschaltet werden.
- Stellt man durch Klemmenspannungs- bzw. Kapazitätsmessung das Abfallen einzelner Zellen fest, so werden die Kapazitätsunterschiede durch Ausgleichsladen behoben.

Wesentlichen Einfluß auf die Klemmenspannung und vor allem

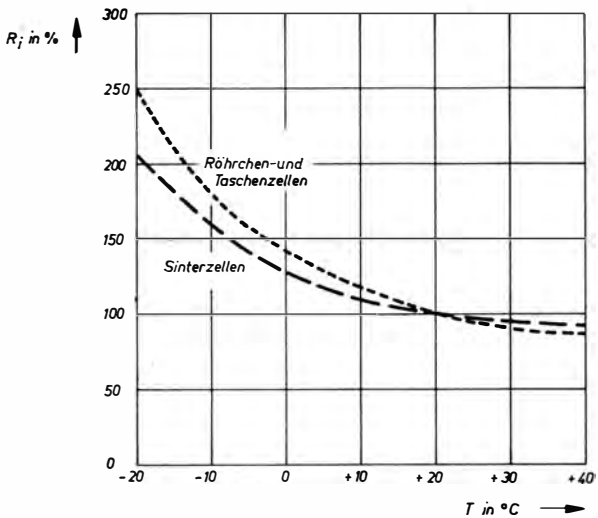


Bild 4.4 Temperaturverhalten des Innenwiderstands des offenen Nickel-Kadmium-Akkumulators

auf die Kapazität des Nickel-Kadmium-Akkumulators hat die Temperatur, da sie eine starke Veränderung der Leitfähigkeit des Elektrolyten und damit des Innenwiderstands der Zellen bewirkt. Gegenüber der Betriebstemperatur von +20 °C sinkt der Innenwiderstand der Zellen mit abnehmender Temperatur erheblich (Bild 4.4). Aus dem Diagramm läßt sich auch ersehen, daß der Einfluß bei Sinterzellen geringer ist. Diese haben daher auch ein wesentlich besseres Tieftemperaturverhalten als Taschenzellen. Die Verringerung des Innenwiderstands bei Temperaturen über +20 °C ist minimal. Das gilt auch für das Temperaturverhalten der Kapazität (Bild 4.5). Während Taschenzellen bei −20 °C nur noch 50% der Nennkapazität K_5 (für +20 °C) aufweisen, haben Sinterzellen bei −20 °C noch 70% Kapazität und bei −40 °C sogar noch 35% Kapazität. Für das Entladen bei Temperaturen von $T > +35$ °C und $T < -20$ °C sind die Hinweise im Abschnitt 4.2.2., Wartung, zu beachten.

Steht der Nickel-Kadmium-Akkumulator längere Zeit unbenutzt, so unterliegt er auf Grund der chemischen Vorgänge in der Zelle

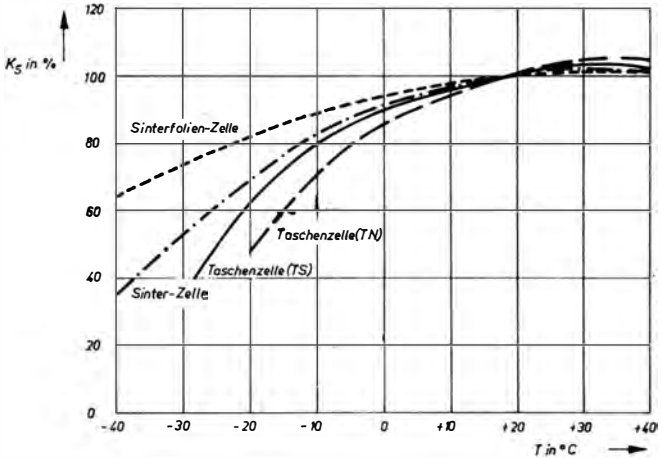


Bild 4.5 Temperaturverhalten der Kapazität des offenen Nickel-Kadmium-Akkumulators

der Selbstentladung. Ohne näher auf die Vorgänge in der Zelle einzugehen, muß man aber wissen, daß im ersten Monat nach dem Laden etwa 25% der Kapazität durch Selbstentladung verlorengehen (Bild 4.6). Nach dem ersten Monat verlangsamt sich die Selbstentladung, so daß der Akkumulator nach 12 Monaten noch etwa 50% der eingeladenen Kapazität aufweist. Großen Einfluß

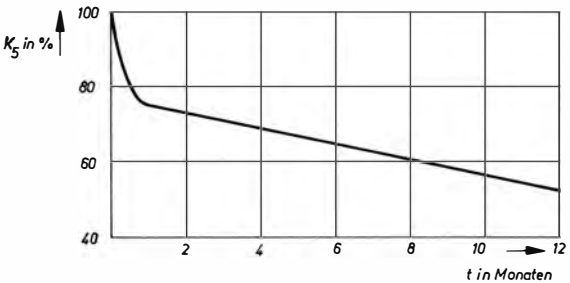


Bild 4.6 Selbstentladung des offenen Nickel-Kadmium-Akkumulators bei + 20 °C

auf die Selbstentladung hat die Elektrolyttemperatur. Bei Temperaturen unter 0 °C ist die Selbstentladung verschwindend gering, während bei Temperaturen über +20 °C eine beschleunigte Selbstentladung zu verzeichnen ist.

4.2.5. Anwendungstechnische Hinweise

Offene Nickel-Kadmium-Akkumulatoren können sowohl geladen als auch entladen gelagert werden. Während des Betriebs und der Lagerung soll die Batterie trocken und die Umgebung frei von korrodierenden bzw. öligen Flüssigkeiten und Gasen sein. Der offene Nickel-Kadmium-Akkumulator kann bei Temperaturen zwischen −50 °C und +50 °C gelagert werden. Bei Belastung mit dem Nennstrom $I_5 = 0{,}2 \cdot K_5$ empfiehlt der Hersteller den Temperaturbereich von −20 °C bis +35 °C.

Die Anwendungsgebiete für den offenen Nickel-Kadmium-Akkumulator sind sehr vielfältig. Im vorliegenden Fall wird die Anwendung auf den Antrieb von Modellen beschränkt. Ehe man ein Modell mit diesem nicht gerade billigen Energiespeicher ausrüstet, sollten Varianten ökonomisch und technisch durchgerechnet werden. Die Überlegenheit des Nickel-Kadmium-Akkumulators gegenüber dem Blei-Akkumulator ergibt sich aus folgenden Eigenschaften: außerordentliche Widerstandsfähigkeit gegen rauheste und härteste mechanische Beanspruchungen, unbegrenzte Lagerfähigkeit unabhängig vom Ladezustand, hohe Lebensdauer bzw. Zyklenanzahl, geringer Wartungsaufwand und Unempfindlichkeit gegen Überladen sowie Tiefentladen. Immer dann, wenn man einen Antrieb längere Zeit (mehrere Jahre) mit häufiger Nutzung (hohe Zyklenanzahl) unverändert betreiben will, haben sich die höheren Anschaffungskosten bald rentiert. Im Vergleich zum Blei-Akkumulator tritt das bereits beim zweiten erforderlich werdenden Blei-Akkumulatorsatz, also meist nach 2 bis 3 Jahren, ein.

Beim Einbau der Akkumulatorzellen im Modell ist auf festen Sitz zu achten. Die Zellengehäuse aus Blech müssen gegeneinander gut und temperaturbeständig isoliert sein. Die Einbaulage ist in der Weise zu wählen, daß die Platten ständig mit Elektrolytflüssigkeit bedeckt sind (s. Abschnitt 4.2.1.). Als Material für Polverbinder bzw. Polbrücken eignet sich am besten vernickeltes Eisenflach-

band ausreichenden Querschnitts. Polbrücken aus Kupfer sind ungeeignet, da es von der Kalilauge angegriffen wird. Die Polverbinder werden mit Polfett leicht eingefettet.
Beim Einbau im Modell ist für ausreichende Belüftung und gegebenenfalls Kühlung der Batterie zu sorgen. Um Kurzschlüsse zu vermeiden, schiebt man über den Polverbinder Isolierschlauch aus PVC und deckt außerdem die gesamte Batterieoberseite mit einer Isolierkappe ab. So können auch zufällig auf die Batterie fallende Metallteile keine Kurzschlüsse verursachen. Für die gesamte Batterie baut man im Modell am besten ein dichtes Fach aus Polystyrol oder PVC. Ausgetretene Kalilauge sammelt sich dann in diesem Gefäß und richtet keinen Schaden im Modell an. Dieses „Gefäß" ist außerdem leichter zu reinigen als das Modellinnere, da man die Batterie ohne Schwierigkeiten herausnehmen kann. Ausgetretene Kalilauge wird mit klarem Wasser abgewaschen. Vorsicht! Kalilauge ist ätzend. Hinweise in Abschnitt 4.2.3. beachten! Sollte trotz der Vorsichtsmaßnahmen Kalilauge in das Modell gelangt sein, so wird das Modell mit Essigwasser ausgewaschen.

4.3. Gasdichte Nickel-Kadmium-Akkumulatoren

4.3.1. Funktion und Aufbau

Gegenüber dem offenen hat der gasdichte Nickel-Kadmium-Akkumulator einige wichtige Vorzüge. Seine Einbaulage ist beliebig, jede Wartung (Nachfüllen von Wasser oder Elektrolytwechsel) entfällt. Durch die Entwicklung von hochbelastbaren Sinterfolienzellen wurde er fast zur idealen Spannungsquelle für Modellantriebe. Dazu zählen auch Hilfsantriebe der Steuerung (Servo, Segelwinde u. a.). Im Prinzip laufen im gasdichten Nickel-Kadmium-Akkumulator die gleichen chemischen Reaktionen wie im offenen Nickel-Kadmium-Akkumulator ab.
Zwei Probleme mußten bei der gasdichten Version beherrscht werden, und zwar die Sauerstoffentwicklung bei Überladung und bei Polumkehrung. Es ging darum, einen Reaktionsmechanismus zu finden, der den frei werdenden Sauerstoff wieder in der Zelle bindet, also verzehrt. Für den Sauerstoffverzehr in den Zellen wurde folgende Lösung entwickelt: In die Kadmium-Elektrode

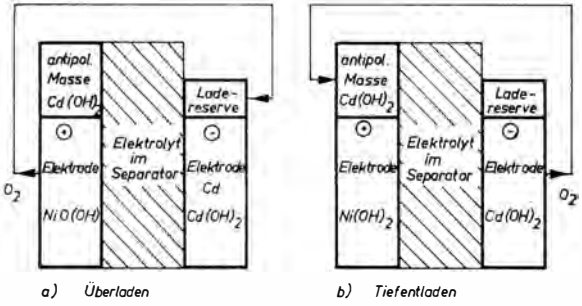


Bild 4.7 Sauerstoffverzehr in der gasdichten Nickel-Kadmium-Zelle. a — beim Laden; b — bei Umpolung

wird mehr aktive Masse $Cd(OH)_2$ eingebaut, als für die Kapazität erforderlich ist. Dieser Überschuß aktiver Masse an der Kadmium-Elektrode ist die Ladereserve (Bild 4.7a). Der beim Laden an der Nickel-Elektrode (+) entstehende Sauerstoff gelangt infolge des Überdrucks in der Zelle durch den Scheider zur Kadmium-Elektrode (—) und wird durch elektrochemische Vorgänge in der Ladereserve gebunden. Umgekehrt würde bei Umpolung der Zelle (Tiefentladung einer Batterie) an der Kadmium-Elektrode Sauerstoff frei werden. Dieser wird dann durch die antipolare Masse (Bild 4.7b), die in der Nickel-Elektrode eingebaut ist, gebunden. Auf diese Weise erreicht man, daß der gasdichte Nickel-Kadmium-Akkumulator begrenzt dauerladefähig (s. Abschnitt 4.3.3.) und umpolsicher (s. Abschnitt 4.2.4.) ist.

Beachten muß man, daß im Vergleich zum offenen Akkumulator durch den Sauerstoffverzehr zusätzliche Wärme entsteht. Diese Wärmeentwicklung beim Überladen bzw. Tiefentladen begrenzt auch die Größe (Kapazität) der gasdichten Zellen, denn das Volumen der Zellen wächst mit der dritten Potenz, die kühlende Oberfläche aber nur quadratisch. Gasdichte Zellen werden daher nur bis zu Kapazitäten von 50 Ah hergestellt. Der Temperaturanstieg beim Einsetzen des Sauerstoffverzehrs ist ein sicheres Zeichen der Volladung einer Zelle und wird bei manchen Ladegeräten zur Ladeendabschaltung benutzt.

Die Bauformen der gasdichten Nickel-Kadmium-Akkumulatoren sind sehr vielfältig (Bild 4.8). Neben Knopfzellen mit Masseelektroden $K_5 = 10$ mAh bis 3Ah gibt es prismatische Zellen mit

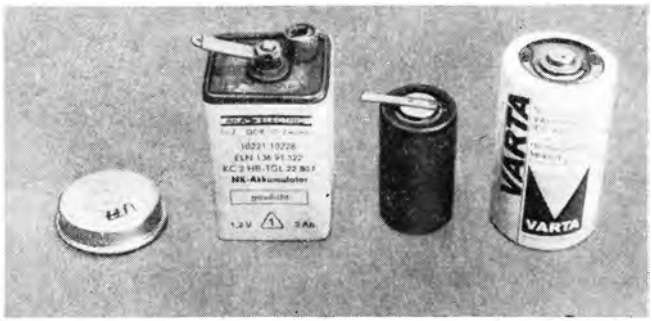


Bild 4.8 Bauformen von gasdichten Nickel-Kadmium-Akkumulatoren (v.l.n.r.): a — Knopfzelle 1,2 V/500 mAh, b — prismatische Zelle 1,2 V/2 Ah; c — Rundzelle mit Sinterelektrode 1,2 V/1,2 Ah; d — Rundzelle mit Sinterelektrode 1,2 V/4 Ah

Masse- und Sinterelektroden $K_5 = 1$ Ah bis 50 Ah und Rundzellen $K_5 = 0{,}1$ Ah bis 10 Ah mit Sinter- bzw. Sinterfolienelektroden.

Bei den Knopfzellen haben die Elektroden und der Scheider Scheibenform. Sie sind im Zellengefäß (Nickelbecher), gasdicht verschlossen, untergebracht (Bild 4.9). Der als Gewebe oder Vlies ausgebildete Scheider ist durch die Kapillarwirkung gleichzeitig Träger des Elektrolyten. Bei den prismatischen Zellen werden die Elektroden ähnlich wie beim offenen Akkumulator als Platten

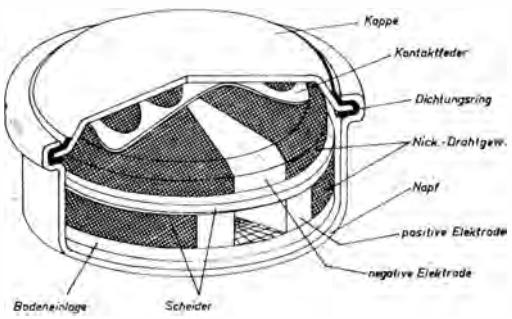


Bild 4.9 Aufbau einer gasdichten Nickel-Kadmium-Knopfzelle

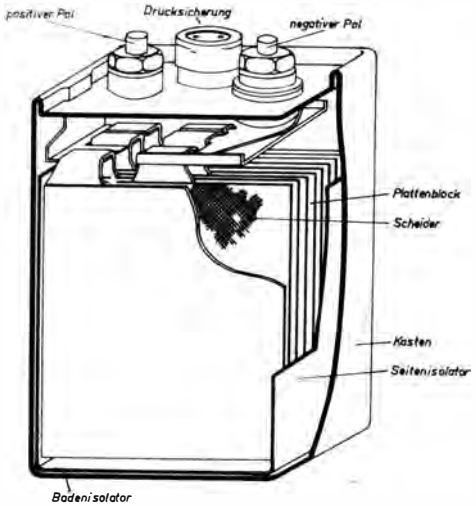


Bild 4.10 Aufbau einer gasdichten prismatischen Nickel-Kadmium-Zelle

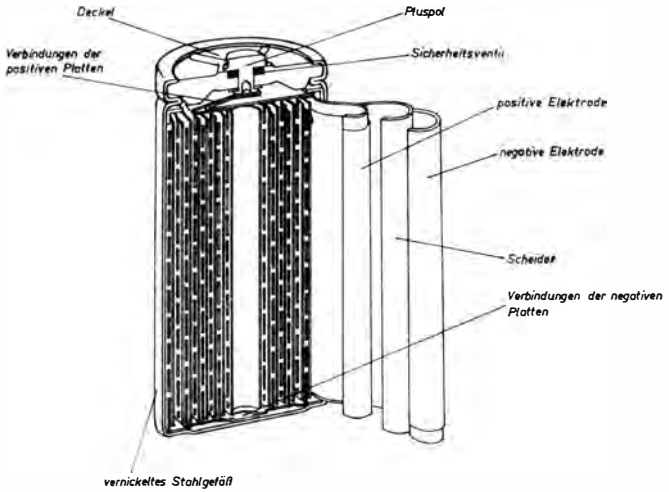


Bild 4.11 Aufbau einer gasdichten Nickel-Kadmium-Rundzelle mit Sinterdektroden

mit dazwischenliegenden Scheidern im verschlossenen Zellengefäß untergebracht (Bild 4.10). Der Scheider trägt auch hier den Elektrolyten. Bei den Rundzellen (Bild 4.11) bilden die Sinterelektroden mit dem Scheider einen Wickel. Die Sinterelektroden mit ihrer großen wirksamen Oberfläche und die Plattenverbinder mit großem Querschnitt sind die Ursache für den niedrigen Innenwiderstand und damit die hohe Belastbarkeit und Schnelladefähigkeit der Sinterzellen. Ein Sicherheitsventil im Deckel verhindert einen zu großen Druckanstieg in der Zelle und damit deren Zerplatzen bei Überlastung. Da aber jedes Öffnen des Sicherheitsventils mit dem Entwickeln von Gas und damit Elektrolytverlust, also Kapazitätsminderung, verbunden ist, sollte man das nur als „Notbremse" betrachten und möglichst nicht in Anspruch nehmen. Bei den Rundzellen ist der Becher der negative Pol und die Mittelelektrode der positive Pol (wie bei den Primärelementen).

4.3.2. Pflege und Wartung

Der Hauptvorteil des gasdichten Nickel-Kadmium-Akkumulators im Vergleich zu anderen Akkumulatorarten besteht darin, daß er praktisch pflege- und wartungsfrei ist. Elektrolyt kann nicht, ja darf nicht nachgefüllt werden. Der gasdichte Nickel-Kadmium-Akkumulator ist ein abgeschlossenes System. Jeder Eingriff führt zur Funktionsunfähigkeit.

4.3.3. Laden

Beim Laden des gasdichten Nickel-Kadmium-Akkumulators sind verschiedene Bedingungen einzuhalten. Dabei muß zwischen den Typen mit Massezellen und denen mit Sinterzellen unterschieden werden. Für das Laden mit Massezellen (Knopfzellen und prismatische Zellen) werden in [8] folgende Hinweise gegeben:
„Laden
Das Laden der gasdichten NK-Akkumulatoren ist mit konstantem Strom durchzuführen. Es darf nur mit Gleichstrom geladen werden. Die Ladeschlußspannung liegt bei etwa 1,5 V/Zelle. Der Nennladestrom $I_L = 0{,}1 \cdot K_5$, (I_L in A, K_5 in Ah soll zu Beginn das Maximum von $0{,}11 \cdot K_5$ nicht überschreiten.

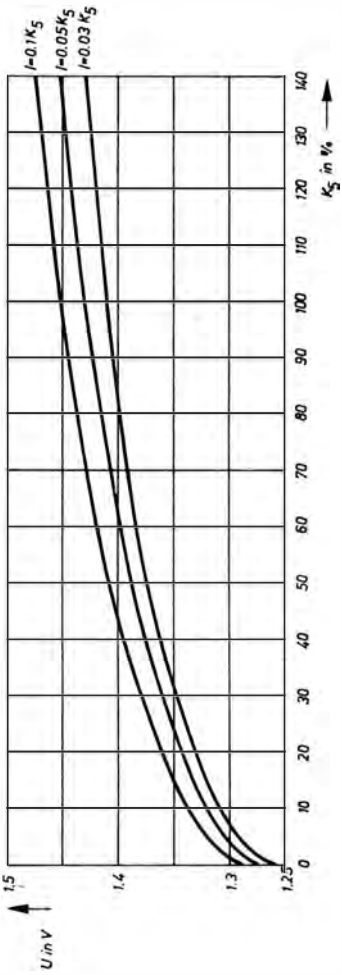


Bild 4.12 Klemmenspannung einer gasdichten Masszelle KC 2 beim Laden mit $I_L = 0{,}1 \cdot K_s$, $I_L = 0{,}05 \cdot K_s$ und $I_L = 0{,}03 \cdot K_s$

Der Ladefaktor der gasdichten NK-Akkumulatoren beträgt 1,4, d. h., es ist jeweils das 1,4fache der entnommenen Kapazität wieder einzuladen.

Überladen ist zu vermeiden. Es schadet der Lebensdauer der

gasdichten Akkumulatoren. Das Laden mit Konstantspannung ist zu vermeiden.

Wird von dem Akkumulator eine dauernde Einsatzbereitschaft gefordert, so kann Erhaltungsladen durchgeführt werden. Hierfür beträgt der maximal zulässige Strom $I_L = 0{,}002 \cdot K_5$. Der Temperaturbereich für das Laden beträgt +15 °C bis +35 °C, doch ist die günstigste Ladetemperatur von +20 °C zu empfehlen."

Beim Normalladen mit $I_L = 0{,}1 \cdot K_5$ ändert sich die Klemmenspannung der Massezelle nach der Kennlinie in Bild 4.12. Massezellen sind nur normal ladefähig, Sinterzellen dagegen auf Grund ihrer konstruktiven Besonderheiten normal, beschleunigt und sogar schnelladefähig.

Da für die Sinterzellen je nach Hersteller unterschiedliche Ladevorschriften gelten, seien im folgenden nur die wichtigsten und allgemeingültigen zusammengefaßt.

Sinterzellen sind in einem weiten Temperaturbereich ladefähig. Die angegebenen Temperaturbereiche besonders beim Schnelladen sollten im Interesse der Lebensdauer eingehalten werden. Ferner muß man beachten, daß die Klemmenspannung beim Laden einen Temperaturgang mit den Koeffizienten $T_k = -4$ mV/K je Zelle hat. Das ist dann wichtig, wenn die Klemmenspannung zur Ladekontrolle benutzt wird (Ladeendabschaltung). Man muß in diesem Zusammenhang aber auch beachten, daß bei Temperaturen über +25 °C der Sauerstoffverzehr an der negativen Elektrode bereits vor Erreichen der Volladung einsetzt. Bei Temperaturen über +25 °C läßt sich daher auch durch Überladen nicht mehr die volle Kapazität erreichen. Die maximal erreichbare Kapazität beträgt bei +45 °C noch 80% von K_5 und bei +60 °C noch 60% von K_5 (letzteres gilt nur für Spezialtypen, die bei Umgebungstemperaturen bis +60 °C betrieben werden können).

— Sinterzellen sind mit dem Normalladestrom $I_L = 0{,}1 \cdot K_5$ dauerladefähig im Temperaturbereich von −10 °C bis +50 °C. Bei Temperaturen unter −10 °C muß der Ladestrom verringert werden. Liegen zum Temperaturbereich keine Angaben des Herstellers vor, so ist im Temperaturbereich +5 °C bis +35 °C zu laden. Die Klemmenspannung der Sinterzelle ändert sich beim Normalladen nach der Kennlinie in Bild 4.13.

Sinterzellen können bis 100 Stunden ohne nachteiligen Einfluß auf Kapazität oder Lebensdauer „normal" mit $I_L = 0{,}1 \cdot K_5$ geladen werden. Längere Ladezeiten sind möglich, aber unwirt-

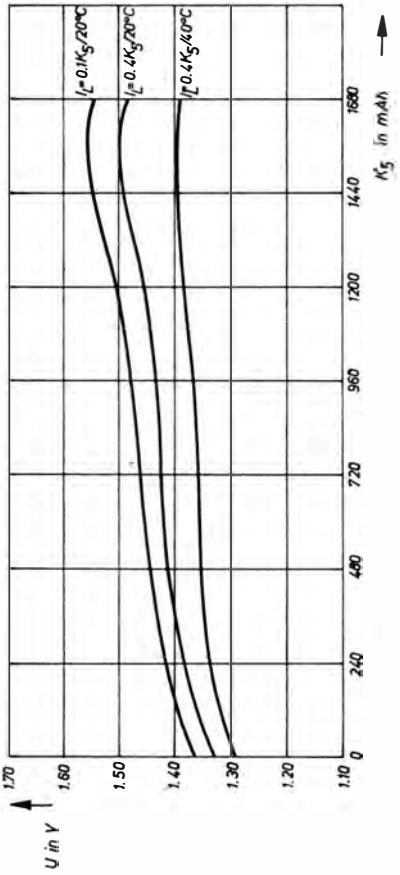


Bild 4.13 Klemmenspannung einer gasdichten Sinterzelle VR 1,2 bei den Ladeströmen $I_L = 0{,}1 \cdot K_5$ bei $+20$ °C, $I_L = 0{,}4 \cdot K_5$ bei $+20$ °C, $I_L = 0{,}4 \cdot K_5$ bei $+40$ °C

schaftlich und unbegründet. Ein Dauerladen mit $I_L = 0{,}1 \cdot K_5$ empfiehlt sich bei Batterien, um Kapazitätsunterschiede zwischen den Zellen auszugleichen. Einige Hersteller gestatten sogar Dauerladeströme von $I_L = 0{,}3 \cdot K_5$. Da die zugeführte elektrische Energie durch Sauerstoffverzehr beim Überladen ganz in Wärme umgewandelt wird, ist auf ausreichende Kühlung der Zellen zu achten. Der hohe Qualitätsstandard bei der Fertigung von gasdichten Sinterzellen führte zu einer Erhöhung der Le-

bensdauer. Einige Hersteller geben eine Lebensdauer von 10 Jahren oder von 1000 bis 2000 Ladezyklen für Normalladen bei Teilentladung an.

— Sinterzellen sind beschleunigt ladefähig (1 bis 7 Stunden). Temperaturbereich +5 °C bis +40 °C. Liegen keine Angaben des Herstellers vor, so ist bei +20 °C zu laden.
Beispiel: $I_L = 0{,}2 \cdot K_5$ während 7 Stunden
oder
$I_L = 0{,}4 \cdot K_5$ während 3,5 Stunden.
Gelegentliches Überladen mit diesen Ladeströmen (Ladezeitüberschreitung) führt nicht zu Schäden an den Zellen. Beim beschleunigten Laden ändert sich die Klemmenspannung nach der Kennlinie in Bild 4.13.

— Sinterzellen sind schnelladefähig (15 bis 60 min). Temperaturbereich +10 °C bis +40 °C. Liegen keine Angaben des Herstellers vor, so ist bei +20 °C zu laden.

Beim Schnelladen muß der Anfangsladezustand bekannt sein. Am besten entlädt man den Akkumulator mit einem in Band 3 beschriebenen Tiefentladungsschutzschalter, um definierte Verhältnisse zu erhalten. Als praktikable Ladeart hat sich das zeitbegrenzte Schnelladen (s. Band 3) bewährt. Durch zeitbegrenztes Schnelladen kann die Zelle oder Batterie nur auf 80% der Nennkapazität aufgeladen werden. Die noch fehlenden 20% Kapazität lädt man „normal" nach. Zum Schnelladeverfahren selbst werden im Band 3 weitere Hinweise gegeben. Die Ladeschlußspannung beträgt beim Schnelladen für $T = +20$ °C $U_Z = 1{,}6$ V. Für das Schnelladen wird bei Einhaltung der Grenzbedingungen (aufladen bis 80% der Nennkapazität, Temperatur) eine Lebensdauer von mehr als 500 Ladezyklen angegeben. Erst danach tritt ein dauernder irreversibler Kapazitätsverlust von mehr als 20% ein.

Die im Abschnitt 4.3.1., Funktion und Aufbau, erwähnte Sicherung gegen Überladen durch Einfügen einer Ladereserve funktioniert nur beim Normalladen und da auch nicht unbegrenzt lange. Beim Schnelladen ist dieser Überladungsschutz überfordert. Um bleibende Schäden (dauernder Kapazitätsverlust) an den Zellen zu vermeiden, muß beim Schnelladen die eingeladene Kapazität (Ladestrom und Ladezeit) genau eingehalten werden (Temperatur beachten!). Das zeitbegrenzte Schnelladen mit vorherigem Entladen der Zellen ist ein praktikables und sicheres

Schnelladeverfahren, bei dem man den Ladestrom mit dem Amperemeter genau kontrolliert und der Ladevorgang mit dem Zeitschalter automatisch beendet wird. Die „schnell" geladene Zelle bzw. Batterie kann zum Erreichen der vollen Kapazität (100%) dann noch mehrere Stunden mit dem Ladestrom $I_L = 0{,}2 \cdot K_5$ weitergeladen werden, ohne Schaden zu erleiden.

- Einige Sinterzellentypen sind ultraschnelladefähig (1 bis 15 min). Temperaturbereich +15 °C bis +30 °C. Die Zellen müssen vorher vollständig entladen und die eingeladene Kapazität genau kontrolliert werden. Die nach dem Ultraschnelladen entnehmbare Kapazität beträgt 25 bis 80% der Nennkapazität.

4.3.4. Entladen

Für das Entladen gasdichter Nickel-Kadmium-Akkumulatoren mit Massezellen werden in [8] folgende Hinweise gegeben

„Entladen

Der Nennentladestrom beträgt $I_E = I_5 = 0{,}2 \cdot K_5$ (I in A, K_5 in A · h). Auf ihn baut sich die Nennkapazität auf. Es gibt Einsatzgebiete, bei denen der Nennentladestrom nicht eingehalten werden kann. Jedoch soll bei Dauerentladung der maximale Entladestrom von $I = 0{,}5 \cdot K_5$ nicht überschritten werden. Bei kurzzeitiger Entladung ist wegen des maximalen Entladestroms Rückfrage erforderlich.

Beim Entladen ist darauf zu achten, daß die Entladeschlußspannung nicht unterschritten wird.

Wird mit größeren Strömen als dem Nennentladestrom entladen, so verringert sich die Kapazität der Akkumulatoren.

Die nutzbare Kapazität bei Entladung mit $I = 0{,}5 \cdot K_5$ beträgt etwa 70% der Nennkapazität (K_5).

Auch für das Entladen ist ein Temperaturbereich festgelegt. Dieser liegt in den Grenzen −20 °C und +35 °C.

Bei −20 °C beträgt die nutzbare Kapazität bei Entladen mit $I = 0{,}2 \cdot K_5$ etwa 30% und bei +35 °C etwa 90% der Nennkapazität. Außerhalb dieses Temperaturbereichs sind die gasdichten Akkumulatoren nicht funktionsfähig; jedoch treten bei Temperaturen unter −20 °C größere, nicht im voraus bestimmbare Kapazitätsschwankungen auf, und bei häufigen Entladungen

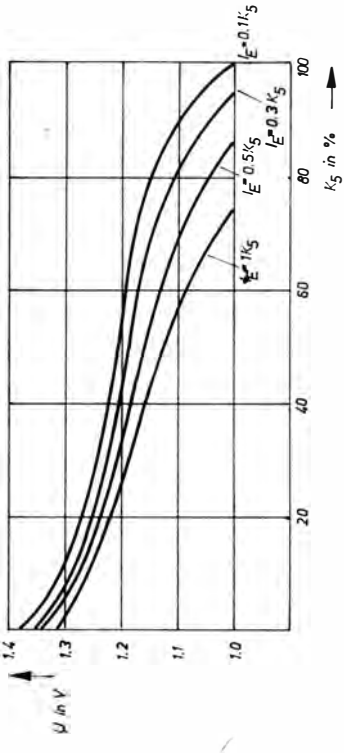


Bild 4.14 Klemmenspannung einer gasdichten Knopfzelle KBM 0,500 bei den Entladeströmen $I_E = 0{,}1 \cdot K_5$, $I_E = 0{,}3 \cdot K_5$, $I_E = 0{,}5 \cdot K_5$, $I_E = 1 \cdot K_5$

über +35 °C ist mit einer Verringerung der Lebensdauer zu rechnen."

Da am Innenwiderstand der Zelle nach (1), $U_i = I_E R_i$, ein innerer Spannungsabfall eintritt, hängt die Klemmenspannung von der Belastung ab. Der Klemmenspannungsverlauf beim Entladen für verschiedene Entladestromstärken einer Knopfzelle ist in Bild 4.14 dargestellt. Prismatische Massezellen haben einen ähnlichen Klemmenspannungsverlauf, nur daß die Einsatzspannung beim Entladen etwa 0,15 V niedriger liegt. Die Ladeschlußspannung ist für beide Typen gleich. An Hand dieser Kennlinien läßt sich durch Klemmenspannungsmessung bei Belastung relativ genau die Kapazität in den Zellen ermitteln. Das ist dann bei der Überprüfung von Batterien wichtig.

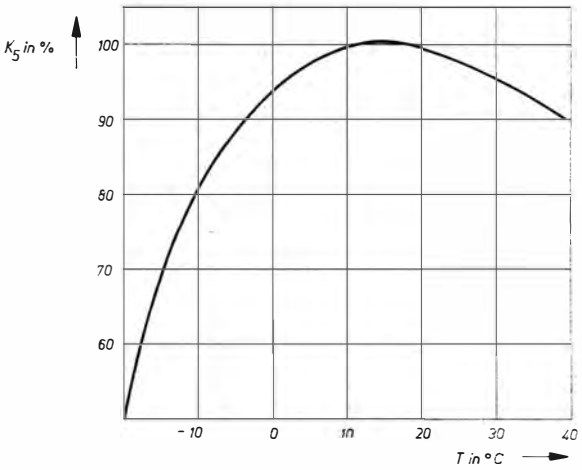


Bild 4.15 Temperaturverhalten der Kapazität einer gasdichten Massezelle KC 2 bei Entladen mit $I_E = 0{,}1 \cdot K_5$

Der am Innenwiderstand der Zelle auftretende Spannungsabfall wird in Wärme umgewandelt. Damit ist die nutzbare Kapazität der Massezellen stark belastungsabhängig. Auf Grund des Temperaturverhaltens des Elektrolyten hängt die Kapazität außerdem noch von der Temperatur ab. Die entsprechenden Zusammen-

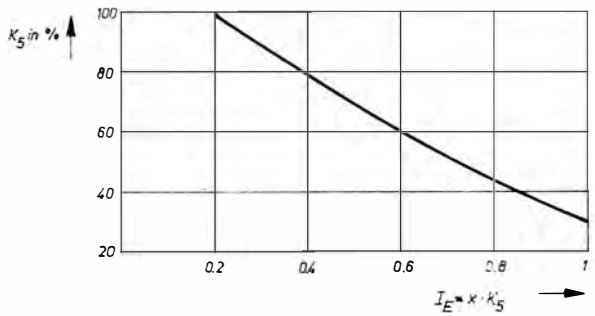


Bild 4.16 Belastungsverhalten der Kapazität einer gasdichten Massezelle KC 2

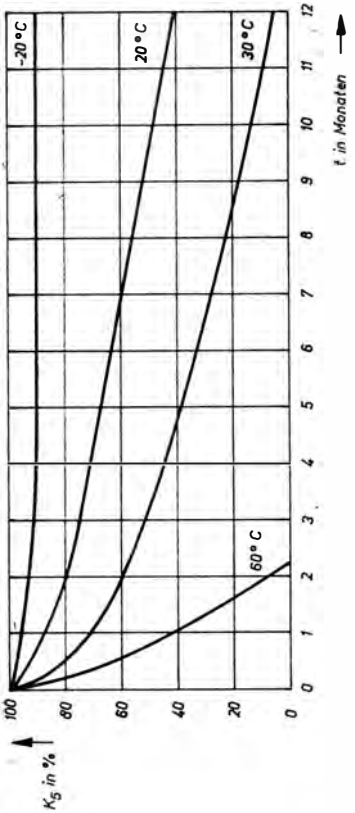


Bild 4.17 Selbstentladung einer gasdichten Massezelle D 4,5 in Abhängigkeit von der Temperatur und der Lagerzeit

hänge sind aus den Kennlinien in Bild 4.15 und Bild 4.16 zu ersehen.

Durch elektrochemische Vorgänge in den Zellen tritt bei Nichtbenutzung Selbstentladung ein. Bei Massezellen ist die Selbstentladung am Anfang relativ stark und verlangsamt sich dann (Bild 4.17). Aus den Kennlinien ist ferner abzulesen, daß die Selbstentladung der gasdichten Massezellen stark von der Temperatur abhängt. Das hat für die Lagerung Bedeutung. Nach 9 Monaten Lagerung bei +20 °C sind durch Selbstentladung etwa 50% Kapazität verlorengegangen.

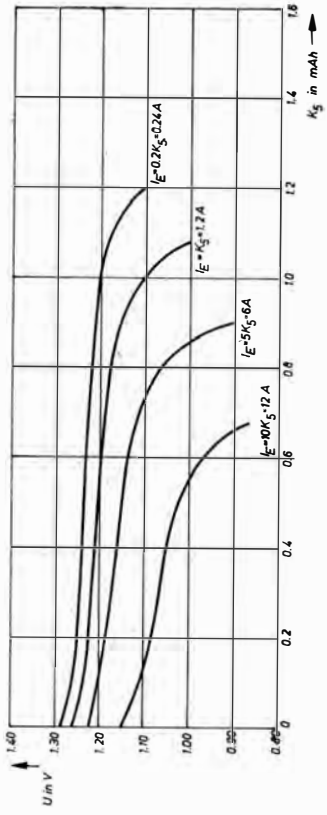


Bild 4.18 Klemmenspannung einer gasdichten Sinterzelle VR 1,2 bei den Entladeströmen $I_E = 0{,}2 \cdot K_5$, $I_E = 1 \cdot K_5$, $I_E = 5 \cdot K_5$, $I_E = 10 \cdot K_5$

Im Vergleich zu den Massezellen zeichnen sich die Sinterzellen durch einen sehr geringen Innenwiderstand aus. Das ist nicht nur bestimmend für das Laden (Schnelladen), sondern auch für das Entladen. Der geringe Innenwiderstand ermöglicht sehr hohe Dauerentladeströme $I_E = 5 \cdot K_5$ bis $10 \cdot K_5$ und auch sehr hohe Entladeströme für Impulsbetrieb $I_E I_{mp} = 20 \cdot K_5$ bis $140 \cdot K_5$. Diese Eigenschaften führten zum verstärkten Einsatz der Sinterzellen in hochleistungsfähigen, aber preiswerten Modellantrieben und ermöglichten die breite Einführung des Elektroflugs.

Den Einfluß des Innenwiderstands und die sehr gute Span-

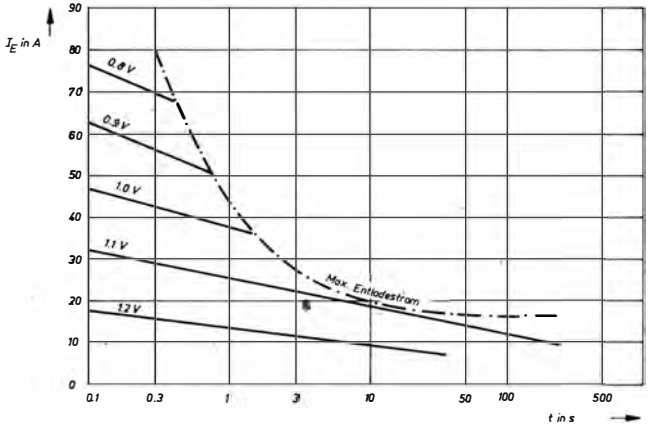


Bild 4.19 Belastungsfähigkeit einer gasdichten Sinterzelle VR 1,2 bei Impulsbetrieb

nungslage der Sinterzellen erkennt man an den Entladekennlinien (Bild 4.18). Bedingt durch die hohen Belastungsströme, wird auch die Entladeschlußspannung niedriger. Noch imponierender sind die Entladekennlinien für Impulsbelastung (Bild 4.19). Bei guter Kühlung kann also eine 1,2-Ah-Zelle maximal mit $I_E = 32$ A im Dauerbetrieb belastet werden. Die normale Belastung beim Elektroflug beträgt $I_E = (8 \ldots 10)$ A, bei einer Entladezeit von 10 min. Die Grenze der Belastbarkeit einer Zelle ist durch die inneren Verluste und die damit bedingte Erwärmung der Zelle (Verlustleistungshyperbel) gegeben. Daraus erkennt man auch, welche Bedeutung die gute Kühlung für hochbelastete Zellen hat.

Interessant ist ferner, daß die nutzbare Kapazität nicht so stark von der Temperatur abhängt wie bei Massezellen (Bild 4.20). Zum Beispiel liegt die Funktionsfähigkeitsgrenze (80% von K_5) einer Sinterzelle bei Belastung mit $I_E = 0{,}1 \cdot K_5$ erst bei etwa -25 °C, während diese Grenze für die Massezelle schon bei etwa -10 °C erreicht ist.

Die Lebensdauer von Sinterzellen wird von den Herstellern mit maximal 10 Jahren angegeben. Sie variiert aber stark mit den Einsatzbedingungen. Die Entladetiefe (entnommene Kapazität,

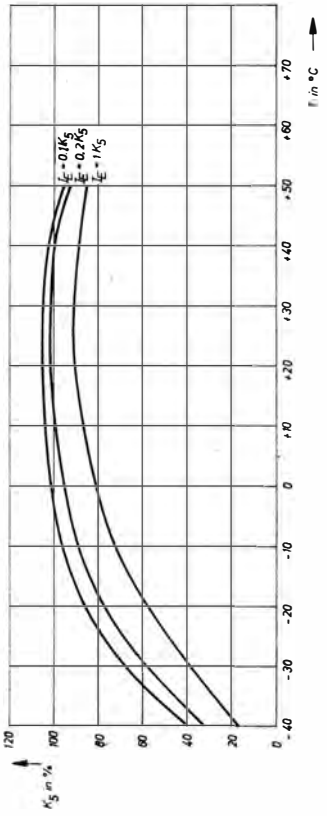


Bild 4.20 Temperaturverhalten der Kapazität einer gasdichten Sinterzelle VR 1,2 beim Entladen mit $I_E = 0{,}1 \cdot K_S$, $I_E = 0{,}2 \cdot K_S$, $I_E = 1 \cdot K_S$

dividiert durch die Nennkapazität, in %) bestimmt ganz wesentlich die Lebensdauer. Erfahrungswerte für die Lebensdauer sind:

— etwa 500 Zyklen für eine Entladetiefe von 100%,
— etwa 2000 Zyklen für eine Entladetiefe von 50%.

Man kann also die Lebensdauer von Sinterzellen durch Teilentladungen sehr positiv beeinflussen. Entscheidend für die Lebensdauer der Sinterzelle ist auch die Zellentemperatur. Zum Beispiel verringert sich die Lebensdauer von Standardzellen ($T_{max} = +45$ °C) von 100% bei +25 °C für die Temperaturerhöhung auf +35 °C auf 65%. Bei Hochtemperaturzellen ($T_{max} = +65$ °C)

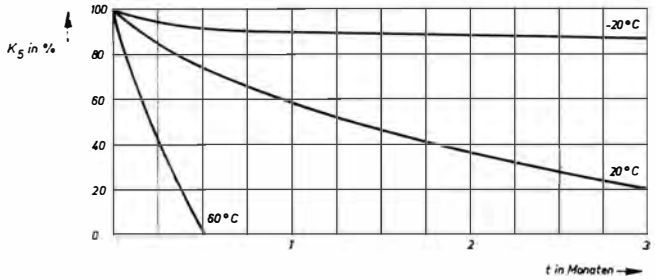


Bild 4.21 Selbstentladung einer gasdichten Sinterrundzelle RS 1,2 in Abhängigkeit von Temperatur und Lagerzeit

ändert sich die Lebensdauer von 100% bei +25 °C auf 70% bei +35 °C.

Durch elektrochemische Vorgänge in den Sinterzellen tritt Selbstentladung ein, die wie bei den anderen Zellentypen stark temperaturabhängig ist (Bild 4.21). Das Maß der Selbstentladung hängt von der Zellenkonstruktion ab, so daß es je nach Fabrikat recht unterschiedliche Angaben gibt. Bei hochwertigen Sinterzellen ist die Selbstentladung geringer als bei Massezellen. Zum Beispiel beträgt die nutzbare Kapazität der Zelle VR 1,2 nach 1monatiger Lagerung bei +20 °C noch etwa 80% der Nennkapazität. Aus den Kennlinien läßt sich ableiten, daß man für die Fälle, in denen mit dem Modell Hochleistungen erzielt werden sollen, ein Nachladen unmittelbar vor dem Einsatz empfehlenswert ist.

Die im Abschnitt 4.3.1., Aufbau und Funktion, erwähnte Sicherung gegen Tiefentladen, die bei den meisten Masse- und den Sinterzellen eingebaut ist, funktioniert nur bei Belastung der Zellen mit dem Nennstrom $I_E = 0{,}2 \cdot K_5$, dann aber auch nur für eine begrenzte Anzahl von Umpolungen. Diese Sicherung wird auf jeden Fall überfordert, wenn man die Zelle hoch belastet und dabei umpolt. Mehrmaliges Umpolen bei Belastungen mit $I_E = 1 \cdot K_5$ bis $10 \cdot K_5$ führt zu Dauerschäden an den Zellen. Bei Hochstrombelastung von Batterien ist daher auf jeden Fall das Unterschreiten der Entladeschlußspannung (0,8 V je Zelle bei $I_E = 10 \cdot K_5$ — s. Bild 4.18) zu vermeiden. Die im Band 3 beschriebenen Tiefentladungsschutzschaltungen sind sehr gut geeignet, Schäden zu verhüten bzw. Geld zu sparen.

4.3.5. Anwendungstechnische Hinweise

Bei der Verwendung gasdichter Nickel-Kadmium-Zellen im Modell muß man seine besondere Aufmerksamkeit auf die ausreichende Kühlung richten. Für Hochleistungsantriebe sind unter Umständen besondere Maßnahmen zur Kühlung der Batterie erforderlich (s. Band 3). Hat sich eine Batterie infolge starker Belastung und nichtausreichender Kühlung (gegebenenfalls auch hoher Umgebungstemperatur, direkte Sonneneinstrahlung) auf über +35 °C erwärmt, so sollte man die Batterie vor der erneuten Schnelladung abkühlen lassen. Dieser geringe Zeitaufwand wirkt sich vorteilhaft auf die Lebensdauer aus. Erwärmt sich beim Laden oder Entladen der Batterie eine Zelle stärker als die anderen, so ist durch Klemmenspannungsmessung unter Belastung an jeder einzelnen Zelle die Kapazität zu kontrollieren. Abweichungen der Zellenkapazitäten sind durch Ausgleichsladung zu beseitigen, bzw. schadhafte Zellen sind auszusondern oder auszuwechseln.

Für die Lagerung von gasdichten Zellen oder Batterien gibt es außer der Einhaltung der Lagertemperatur (−30 °C bis +40 °C, für besondere Zellentypen auch +65 °C) keine Vorschriften. Zur Vermeidung zu starker Selbstentladung sollten gasdichte Nickel-Kadmium-Akkumulatoren trocken und kühl gelagert werden. Wegen der hohen Belastbarkeit können Kurzschlüsse an Sinterzellen außer zu Schäden an den Zellen auch zu Schäden am Gerät (Wärmeentwicklung) und eventuell zu Verbrennungen führen. Es empfiehlt sich also, Zellen oder Batterien, deren Anschlüsse frei liegen, möglichst entladen zu lagern.

Abgesehen von dieser Vorsichtsmaßnahme ist es ohne nachteiligen Einfluß auf die Lebensdauer, ob der gasdichte Nickel-Kadmium-Akkumulator geladen. teilweise geladen oder entladen gelagert wird. Allerdings muß man wissen, daß die gasdichten Nickel-Kadmium-Zellen nach längerer Lagerung zunächst nicht ihre Nennkapazität abgeben. Die volle Kapazität wird erst nach einigen Lade-Entlade-Zyklen erreicht. Dabei ist es vorteilhaft, wenn bei den ersten Zyklen ein Ausgleichsladen vorgenommen wird. Der Amateur braucht sich also nicht zu wundern, wenn der Nickel-Kadmium-Akkumulator nach dem Winterschlaf nicht seine Nennkapazität abgibt — er muß eben erst richtig geweckt werden.

Auf die Temperaturbereiche für den Einsatz der gasdichten Nickel-Kadmium-Akkumulatoren und deren Temperaturverhalten wurde in den Abschnitten 4.3.3., Laden, und 4.3.4., Entladen, hingewiesen. Soll der Elektroantrieb auch bei tiefen Temperaturen (unter −10 °C) noch seine Nennleistung erreichen, so ist den Sinterzellen wegen ihres guten Tieftemperaturverhaltens der Vorzug zu geben. Die anwendungstechnischen Vorteile des gasdichten Nickel-Kadmium-Akkumulators ermöglichen seinen Einsatz in Flug-, Schiffs- und Automodellen gleichermaßen gut. Für Hochleistungsantriebe (Elektroflugmodelle, Geschwindigkeitsschiffsmodelle) sind Sinterzellen wegen ihrer hohen Belastbarkeit besonders geeignet.

Für Modellantriebe muß man in der Regel Batterien aus Einzelzellen zusammenschalten. Für die Reihen- und Parallelschaltung werden in [8] folgende Hinweise gegeben:

Batterie-Reihenschaltung

Einzelzellen dürfen in Reihe bis 12 V geschaltet werden. Der maximale Entladestrom für 12-V-Batterien beträgt $I = 0{,}2 \cdot K_5$ (I in A, K_5 in Ah). Größere Spannungen sind nach Möglichkeit zu vermeiden. Während bei einer neuen Batterie alle Zellen eine fast gleiche Charakteristik zeigen, können nach einer unbestimmten Zeit Zellen in ihrer Kapazität nachlassen. Bis zu 12-V-Batterien läßt sich die vorzeitige Entladung einer Zelle durch Messen an der Gesamtspannung feststellen, was bei höheren Spannungen nicht mehr der Fall sein wird, da bei NK-Zellen keine konstante Spannung vorhanden ist, sondern diese in den Grenzen von 1,35 bis 1,1 V je nach Belastung und Entladezeit schwankt. Diese einzelne Zelle wird bei vollständiger Entladung der Batterie tiefentladen und nimmt eine umgekehrte Spannung an (Umpolung). Das Umpolen ist mit einer der Batterie-Entladestromstärke proportionaler Gasentwicklungsintensität verbunden, die in ungünstigen Fällen zu einer Aufbauchung der Zelle führt.

Ist in Einzelfällen eine größere Spannung als 12 V erforderlich, so sind bestimmte Sicherheitsvorkehrungen zu treffen, wodurch die abgefallenen Zellen erkannt und ausgesondert werden können.

Parallelschaltung

Parallelschaltungen sind grundsätzlich zu vermeiden. Ist in besonderen Anwendungsfällen eine Parallelschaltung erforderlich,

so dürfen nur Akkumulatoren eines Typs parallelgeschaltet werden. Weiterhin sind nur Akkumulatoren mit gleichem Herstellzeitraum (Monat und Jahr) zu verwenden. Es wird empfohlen, nur Akkumulatoren mit gleichen Kenndaten wie Innenwiderstand und Ladeschlußspannung zu verwenden. Daher ist auch das Zusammenschalten von neuwertigen mit gebrauchten Akkumulatoren zu unterlassen. Beim Zusammenschalten ist auf kürzeste Verbindungsleitungen mit geringstem Widerstand zu achten, und die Zu- und Ableitung ist möglichst in der Mitte anzuordnen. Parallelgeschaltete Akkumulatoren dürfen nicht mit einem größeren Entladestrom als $I = 0{,}2 \cdot K_5$ (I in A, K_5 in A·h) entladen werden."

Diese für Massezellen geltenden Hinweise sollten auch bei der Verwendung von Sinterzellen beachtet werden, obwohl Sinterzellen in dieser Hinsicht nicht so empfindlich sind.

Vom Parallelschalten zum Gewinnen größerer Kapazitäten ist nicht nur von der elektrischen Seite her, sondern auch aus finanziellen Gründen abzuraten. Zum Beispiel hat eine Zelle mit $K = 2$ A · h einen wesentlich geringeren Preis als 2 Zellen mit $K = 1$ A · h. Die abgestuften Typenreihen ermöglichen zudem die optimale Anpassung der Batteriekapazität an den Antrieb. Gas-

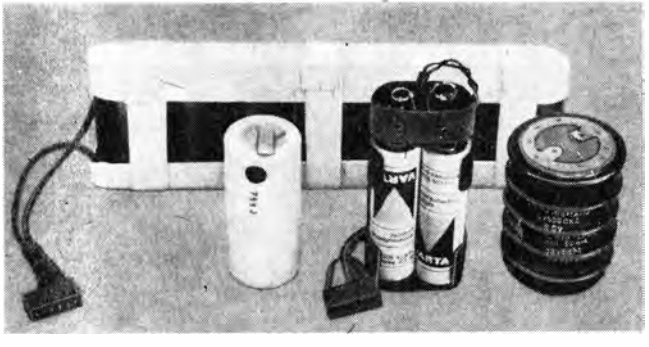


Bild 4.22 Konfektionierung von gasdichten Nickel-Kadmium-Zellen. a — Batterie aus Sinterzellen 2,4 V/500 mAh; b — Batterie aus Rundzellen 4,8 V/500 mAh; c — Batterie aus Knopfzellen 6 V/500 mAh, d — (im Hintergrund) Batterie aus Sinterzellen 8,4 V/1,2 Ah

dichte Nickel-Kadmium-Akkumulatoren werden vom Hersteller als Einzelzellen, aber auch in den unterschiedlichsten Abstufungen und Formen als Batterien fertig konfektioniert angeboten s. a. (Bild 4.8).

Bei der Konfektionierung der gasdichten Zellen gibt es recht unterschiedliche Formen (Bild 4.22). Während die Knopfzellen zu Batterien gestapelt werden (Bild 4.22c), kann man Rundzellen gestapelt (Bild 4.22a) oder als Batteriepack (4.22b) zusammenfügen. Batteriepacks werden auch aus 6 oder 8 Zellen bzw. für höhere Spannungen aus Säulen mit entsprechenden Doppelzellen hergestellt. Für bestimmte Anwendungen sind die Zellen auch reihenweise zur Batterie zusammengeschaltet (Bild 4.22d). Gerade die letztere Form bietet bei der Anwendung in Elektroflugmodellen Vorteile. Rundzellen für Batterien erhalten eine temperaturbeständige Isolation, damit zwischen den Zellenbechern kein Kurzschluß entsteht. Im einfachsten Fall stellt man die Batterie je nach dem Platzangebot im Modell selbst her, indem die Zellen in Reihe oder als Paket angeordnet und mit Selbstklebeband zusammengehalten werden. Besser für die Handhabung und gleichzeitig als Schutz vor mechanischen Beschädigungen ist ein Gehäuse aus Kunststoff (4.22b und d).

Allerdings muß man bei hochbelasteten Zellen für ausreichende Kühlung sorgen. Es empfiehlt sich also nicht, die Zellen vollständig einzupacken. Auf die gute Isolation der Zellenverbinder und Anschlüsse (Steckverbinder) gegeneinander und nach außen sollte man aus den bereits erläuterten Gründen großen Wert legen, damit nicht durch die Berührung mit Metallteilen unerwünschte und meist auch schädliche Kurzschlüsse entstehen.

Bei der Selbstherstellung von Batterien ist auf folgendes unbedingt zu achten:

— Ein loses Aufeinanderschichten von Zellen führt meist zu Kontaktschwierigkeiten und damit zu erhöhten Verlusten.
— Zellenverbindungen sollten durch Löten oder Schweißen hergestellt werden. Für den Amateur kommt meistens das Löten in Frage, da er nur selten Zugang zu geeigneten Punktschweißgeräten haben dürfte. Außerdem sind Lötverbindungen wieder lösbar. Bei allen gasdichten Zellen darf nur an den aufgeschweißten Lötanschlüssen (Ringlötösen, Streifenableiter, Lötösen u. a.) gelötet werden. Das Löten am Zellenbecher oder Zellendeckel führt zu Schäden an der Zelle.

— Als Zellenverbinder (auf ausreichenden Querschnitt achten!) eignen sich Blechstreifen aus Nickel, vernickeltem Stahlblech oder V2A. Kupfer und Kupferlegierungen (Messing, Bronze) können Lokalelemente hervorrufen, die die Zellengefäße angreifen und gegebenenfalls zerstören.
— Bei der Zusammenschaltung der Zellen zu Batterien ist auf ausreichende und temperaturbeständige Isolation der Zellengefäße und -verbinder zu achten.

Welchen Zellentyp man verwendet, hängt in erster Linie vom Kapazitätsbedarf und von der Belastbarkeit, aber auch vom Preis und der Beschaffbarkeit ab. Für kleine Leistungen reichen Knopfzellen oft schon aus. Bei größerem Kapazitätsbedarf bis 10 Ah stehen Rundzellen zur Verfügung, wobei die hochbelastbaren Sinterzellen anwendungstechnische Vorteile bieten. Werden noch größere Kapazitäten benötigt, so sollte man auf prismatische Zellen (bis 50 Ah) zurückgreifen.

5. Silber-Zink-Akkumulatoren

5.1. Allgemeines

Das Silber-Zink-Element gibt es als Primär- und als Sekundärelement. Als Sekundärelement (Akkumulator) wurde es in den vergangenen Jahren vor allem in Hochleistungsmodellen, und da besonders in Schiffsmodellen der Klassen F1 und F3, eingesetzt. Bei diesem Akkumulator handelt es sich um eine sehr kostenaufwendige Spannungsquelle, die ihre Nennleistung nur bei genauer Einhaltung der Behandlungsvorschrift erreicht. Im folgenden werden für den Amateur die wichtigsten Fakten zusammengetragen.

Die Kombination Silber-Zink reizte die Techniker zur Konstruktion eines Elements wegen der hohen Zellenspannung und der großen Energiedichte von 80 bis 250 $mWh \cdot cm^{-3}$. Neben diesen Vorzügen zeichnet sich der Silber-Zink-Akkumulator durch hohe Entladeströme (bis $I_E = 20 \cdot K_1$) und die lange Lagerfähigkeit (bis 5 Jahre) der trockenen Zellen aus. Trockene bereits vorgeladene formierte Zellen sind durch Einfüllen des Elektrolyten schnell einsatzbereit. Der Ladefaktor beträgt 1 bis 1,05, die Selbstentladung ist gering. Diese Vorzüge sind bestechend.

Um aus der Kombination Silber-Zink einen praktisch brauchbaren Akkumulator zu entwickeln, mußten allerdings eine Reihe von technischen und technologischen Problemen beherrscht werden. Die von den Amateuren verwendeten Silber-Zink-Akkumulatoren sind in der Regel Spezialentwicklungen für militärische Geräte. Vor allem bei der Stromversorgung von tragbaren Funkgeräten kommt es auf geringes Gewicht und hohe Leistungsdichte an. Aber auch beim Einsatz in der Weltraumtechnik hat sich der Silber-Zink-Akkumulator bewährt. Die von den Amateuren in der DDR verwendeten Silber-Zink-Zellen stammen meist aus bulgarischer oder ungarischer Produktion. Vergleichbare Typenreihen werden aber auch in der UdSSR, der ČSSR und der VR Polen hergestellt.

Tabelle 5.1. Daten von Silber-Zink-Akkumulatoren

Bauform	Kapazität in A · h	Nennstrom I_E in A	Nennspannung U_Z in V	maximaler Strom $I_{E\,max}$ in A	Energiedichte in mWh · cm^{-3}	Innenwiderstand R_i in Ω
normal	K_1	$0{,}1 \cdot K_1$	1,5	$5 \cdot K_1$	100 ... 270	$0{,}20/K_1$
Hochstrom	K_1	$1 \cdot K_1$	1,5	$20 \cdot K_1$	65 ... 170	$0{,}03/K_1$
Hochstrom formiert	K_1	$1 \cdot K_1$	1,5	$25 \cdot K_1$	70 ... 180	$0{,}02/K_1$

5.2. Funktion und Aufbau

Beim Silber-Zink-Akkumulator besteht die negative Elektrode aus Zink, die positive Elektrode aus Silberoxid. Der Elektrolyt ist konzentrierte Kalilauge mit der Dichte 1,4 g · cm^{-3}. Beim Entladen und Laden läuft folgende chemische Reaktion ab:

$$2\,Zn + Ag_2O_2 + H_2O \underset{\text{Laden}}{\overset{\text{Entladen}}{\rightleftharpoons}} ZnO + Zn(OH)_2 + 2\,Ag$$

negative Elektrode — positive Elektrode

Das metallische Zink löst sich beim Entladen im Elektrolyten. Es wird beim Laden zwar wieder abgeschieden, bildet dabei aber Dendriten (verästelte Metallablagerung), die bereits nach kurzer Zeit die Elektroden kurzschließen. Erst durch die Entwicklung semipermeabler Scheider, die die Dendritenbildung verhindern, war es möglich, gebrauchsfähige Silber-Zink-Akkumulatoren aufzubauen. Allerdings bestimmt auch heute noch die Haltbarkeit des Scheiders die Lebensdauer der Zellen. Wird der Scheider brüchig und durchlässig, dann bilden sich Dendriten, es entstehen innere Kurzschlüsse (Plattenschlüsse), und die Zelle ist unbrauchbar. Durch die Auslegung des Scheiders und der Platten (Dicke) kann man Zellen mit ganz bestimmten Eigenschaften konstruieren. Beim Silber-Zink-Akkumulator werden folgende 3 Bauformen unterschieden: normale Zelle, Hochstromzelle und formierte Hochstromzelle. Die wesentlichen Daten dieser Zellen sind aus

Bild 5.1
Silber-Zink-Zellen SZ-1,5 (links) und SZD-12 (rechts)

Tabelle 5.1. ersichtlich (nach [14]). Bei diesen Angaben handelt es sich um Näherungswerte, besonders bei den Angaben zum Innenwiderstand, da dieser wesentlich vom Ladezustand abhängt. Silber-Zink-Zellen werden mit Kapazitätswerten von $K_1 =$ 0,5 Ah bis 120 Ah hergestellt. Für den Amateur haben in erster Linie die Hochstromzellen von $K_1 = 0{,}5$ Ah bis 5 Ah Bedeutung. Die Abmessungen und Gehäuseformen sind je nach Hersteller recht unterschiedlich. Die Gehäuse werden meist aus durchsichtigem Polystyrol (Bild 5.1), z. T. auch aus Polyäthylen hergestellt. Der Gehäusewerkstoff (temperatur- und schlagempfindlich) und der stark ätzende Elektrolyt (hochkonzentrierte Kalilauge) bedingen einige anwendungstechnische Konsequenzen (s. Abschnitt 5.6).

5.3. Pflege und Wartung

Der Silber-Zink-Akkumulator ist ein teurer Bauteil, der selbst bei spezieller Behandlung nur eine kurze Lebensdauer hat. Damit der Akkumulator seine Nenndaten erreicht, müssen die Behandlungsvorschriften genau eingehalten werden. Jede Nachlässigkeit diesbezüglich „geht sofort ins Geld". Zur Behandlung, als Pflege und Wartung im weiteren Sinne, gehören auch das Laden und Entladen.

Die Pflege des Silber-Zink-Akkumulators besteht in der äußeren Sauberhaltung. Ausgetretene oder verschüttete Lauge am oder an den Anschlüssen wäscht man nur mit warmem sauberem Leitungswasser (ohne Reinigungsmittel!) ab. Anschließend wird trockengerieben. Zur Reinigung auf keinen Fall chemische Reinigungsmittel (Benzin, Spiritus, Fit o. ä.) verwenden! Das Gehäuse und der Deckel dürfen nicht mit Fett oder Öl in Berührung kommen! Die Entlüftungen (Ventile) der Zellen sind sauberzuhalten.

Zur Wartung des Akkumulators genügt es im Prinzip, den Elektrolytstand regelmäßig zu kontrollieren. Der Elektrolytstand muß zwischen 2 Marken am Gehäuse liegen. Bei Elektrolytverlust wird nur Kalilauge der Dichte 1,4 $g \cdot cm^{-3}$ nachgefüllt. Vorsicht, Kalilauge ätzt stark! Die Ventile sind immer geschlossen zu halten, da das Kohlendioxid der Luft die Lauge sonst sehr schnell karbonatisiert (neutralisiert) und sie damit un-

brauchbar wird. Die Angaben des Elektrolytstands beziehen sich auf +20 °C. Wegen der geringen Lebensdauer von einem halben, maximal einem Jahr bei Hochstromzellen ist ein Elektrolytwechsel nicht erforderlich. Zur Wartung gehören ferner das vorschriftsmäßige Formieren der Zellen und das regelmäßige Nachladen (s. a. Abschnitt 5.4.).

5.4. Laden

Damit die Silber-Zink-Zellen ihre Leistungsdaten erreichen, muß man sie sorgfältig formieren (Inbetriebsetzungsladen!). Bei bereits formierten (vorgeladenen) Zellen empfiehlt sich ebenfalls ein Formierungszyklus, da sich dadurch die Lebensdauer erhöht. Nichtformierte Hochstromzellen erhalten 3, mindestens aber 2 Formierungszyklen.

Formieren (Inbetriebsetzungsladen)
In der Regel wird die zum Füllen der Zellen erforderliche Menge Elektrolyt mit den Zellen zusammen geliefert. Der Elektrolyt ist wegen der Karbonatisierung geschlossen aufzubewahren. Steht der Elektrolyt nicht bzw. nicht in ausreichender Menge zur Verfügung, so kauft man in der Drogerie oder Chemikalienhandlung chemisch reine Kalilauge der Dichte 1,4 $g \cdot cm^{-3}$.
Lebensdauer und Belastbarkeit des Silber-Zink-Akkumulators lassen sich erheblich verbessern, wenn man der Kalilauge eine Spur Lithiumhydroxid zusetzt (8 g $LiOH \cdot H_2O$ auf 1 l Elektrolyt). Ein ähnliches Verhalten wurde auch beim offenen Nickel-Kadmium-Akkumulator festgestellt. Die Geräte zum Arbeiten mit Kalilauge sollten möglichst nur aus Glas oder aus Porzellan, eventuell auch aus Polystyrol oder Polyäthylen sein. Sie werden nach dem Gebrauch in warmem Wasser (ohne Reinigungsmittel!) abgespült. Die Zelle wird mit Elektrolyt bis zur oberen Markierung gefüllt. Nach 24 Stunden füllt man bis zur unteren Markierung nach und läßt die Zelle weitere 24 Stunden stehen. Nach 48 Stunden muß der Elektrolytstand bei der unteren Markierung liegen. Bei Zellen, die länger als 2 Jahre gelagert wurden, sind die Platten meist ausgetrocknet. In diesem Fall verdoppelt man die Tränkungszeit auf etwa 90 Stunden. Danach erreichen auch diese Zellen die Nenndaten.

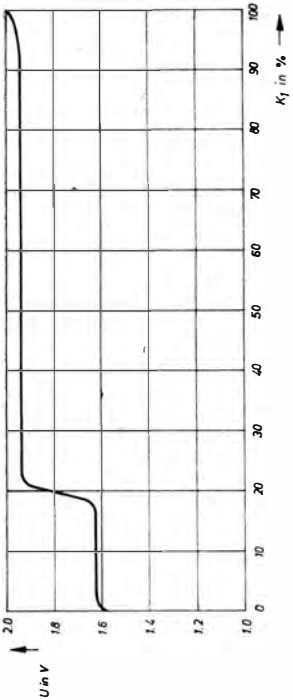


Bild 5.2 Ladekennlinie einer Silber-Zink-Zelle SZ-1,5

Nach dem Tränken wird jede Zelle mit $I_L = 0{,}1 \cdot K_1$ bis zum Erreichen der Ladeschlußspannung von 2,05 V je Zelle normalgeladen. Die Ladekennlinie weist bei Erreichen der Volladung einen deutlichen Anstieg auf (Bild 5.2). Aus der chemischen Reaktionsgleichung erkennt man, daß beim Laden Wasser entsteht; dadurch steigt der Elektrolytstand bis zur oberen Markierung. Aus dem Elektrolytstand läßt sich also auf den Ladezustand schließen:

— obere Markierung $\triangleq$ vollgeladen,
— untere Markierung $\triangleq$ entladen.

Nach dem Laden bleibt der Akkumulator 10 Stunden stehen, ehe man ihn mit $I_E = 0{,}1 \cdot K_1$ entlädt.

An dieser Stelle ist auf 2 Besonderheiten der Silber-Zink-Zellen hinzuweisen. Noch deutlicher als bei anderen Akkumulatortypen

sind Kapazitätsunterschiede zwischen den Zellen ausgeprägt. Da der Silber-Zink-Akkumulator als Spannungsquelle in Hochleistungsantrieben eingesetzt wird, muß jede Zelle einer Batterie auf volle Kapazität aufgeladen werden. Beim Laden im Batterieverband erreicht man das aber nicht, da ein Ausgleichsladen nicht möglich ist. Um trotzdem das Volladen jeder Zelle zu gewährleisten, hat sich folgende Ladetechnik bewährt: Will man den Batterieverband zum Laden nicht auflösen (es wird noch erläutert, warum das auch elektrisch nicht zweckmäßig ist), so führt man eine Restentladung der einzelnen Zellen durch. Die Batterie wird zunächst mit $I_E = 0{,}1 \cdot K_1$ bis $U_z = (1{,}1 \ldots 1{,}2)$ V je Zelle entladen; bei einer 10zelligen Batterie also bis zur Klemmenspannung $U_B = 11$ V. Anschließend wird jede Zelle einzeln (über eine Glühlampe 1,5 V/0,5 A o. ä.) bis zur Entladeschlußspannung von $U_{ZES} = 1{,}0$ V entladen. Dieser Wert darf mit Rücksicht auf die Lebensdauer (beim Formieren und beim Belasten) keinesfalls unterschritten werden. Zur Kapazitätskontrolle mißt man genau Entladestrom und Entladezeit je Zelle und notiert diese Werte. Um das Restentladen zu vereinfachen, kann man einen der im Band 3 angegebenen Entladeschutzschalter verwenden. Für den vorstehend beschriebenen Fall ist es am einfachsten, eine Z-Diode mit 1 V Z-Spannung (entsprechend belastbarer Typ!) in Reihe zum Entladewiderstand (Glühlampe o. a.) zu schalten.

Bei der Formierung sollten die Zellen einzeln entladen werden. Haben sich dann annähernd gleiche Zellenkapazitäten herausgebildet, so kann man zum Restentladen auch mehrere Zellen zusammenfassen. Dadurch wird der Zeitaufwand wesentlich verringert. Zeigt sich bereits beim Formieren, daß einzelne Zellen nicht ihre Nennkapazität erreichen, dann werden sie gegen andere, ebenfalls formierte Zellen ausgetauscht. Alle Zellen einer Batterie müssen die gleiche Kapazität (Nennwert) und das gleiche Herstellungsdatum haben. Eine auf diese Weise entladene Batterie kann auch als Batterie geladen werden, wodurch die Handhabung erheblich vereinfacht wird. Mit der Restentladung ist bereits eine gute Angleichung der Zellenkapazitäten erreicht.

Eine Garantie für die Volladung jeder Zelle bietet aber nur das Einzelladen der Zellen. Dafür gibt es 3 Möglichkeiten.

1. Man trennt die Batterie auf und lädt jede Zelle einzeln und nacheinander.

Vorteil: einfaches, preiswertes Ladegerät.
Nachteil: hoher Zeitaufwand.

2. Man trennt die Batterie auf und lädt jede Zelle einzeln, aber alle gleichzeitig an einem Ladegerät.
   Vorteil: Zeitersparnis.
   Nachteil: Man benötigt ein Ladegerät mit so vielen, möglichst noch automatisch abschaltenden Ausgängen, wie Zellen vorhanden sind, z. B. für 10 Zellen 10 Ausgänge. Die Ausgänge müssen nicht galvanisch getrennt sein, man kommt also mit einer Transformatorwicklung und einem Gleichrichter aus.
3. Man lädt die Batterie als Verband, lädt aber trotzdem jede Zelle einzeln und alle gleichzeitig.
   Vorteil: Zeitersparnis.
   Nachteil: Erheblicher Aufwand beim Ladegerät, da alle Ausgänge galvanisch voneinander getrennt sein müssen. Dieses Ladegerät benötigt neben je einem Vorwiderstand und einer Abschaltautomatik noch eine getrennte Transformatorwicklung und einen Gleichrichter je Ausgang.

Welche der 3 Möglichkeiten der Amateur wählt, wird sicher auch davon beeinflußt, wie häufig geladen werden muß. Bei Variante 1 oder 2 muß man die zweite Besonderheit des Silber-Zink-Akkumulators beachten. Sie besteht darin, daß sich jede Zelle gewissermaßen „an seinen Nachbarn gewöhnt". Löst man den Batterieverband zum Laden auf, so werden vorher die Zellen gekennzeichnet. Nach dem Laden montiert man sie wieder in der gleichen Anordnung. Das ist eine Erfahrung aus der Praxis, ohne daß man erklären kann, warum sich der Silber-Zink-Akkumulator so verhält. Beim Auf- und Einbau der Batterien sind dann außerdem noch einige anwendungstechnische Hinweise zu beachten, auf die in Abschnitt 5.6. eingegangen wird.

Nach 3 Formierungszyklen ist der Akkumulator einsatzbereit. Zwischen Laden und Entladen sollte möglichst eine Pause von 24 Stunden, mindestens aber von 12 Stunden liegen. Das Laden ist auf jeden Fall beim Erreichen der Ladeschlußspannung von $U_{ZLS} = (2{,}0 \ldots 2{,}05)$ V zu beenden.

Alle neueren Zellentypen haben aus Gewichtsgründen keinen Elektrolytüberschuß wie z. B. der offene Blei- oder Nickel-Kadmium-Akkumulator. Überladen oder Ausgleichsladen zum Erreichen der vollen Zellenkapazität ist schädlich und daher zu vermeiden.

Ist beim Formieren nach 25 Stunden die Ladeschlußspannung nicht erreicht, so beendet man das Laden, entlädt den Akkumulator nach einer Pause bis auf die Entladeschlußspannung von 1 V je Zelle und schließt den nächsten Formierungszyklus an. Wird am Ende des Formierens (3. Zyklus) die Ladezeit von 10 Stunden bei allen Zellen wesentlich überschritten, so ist das ein Zeichen für Mängel oder Schäden am Akkumulator. Im Batterieverband müssen alle Zellen annähernd gleichzeitig die Ladeschlußspannung haben (gleiche Kapazität!). Zellen, für die das nicht zutrifft, werden gesondert nachgeladen, aber nicht länger als 5 Stunden. Haben sie dann die Ladeschlußspannung von $U_{ZLS} = 2{,}05$ V noch nicht erreicht, so tauscht man sie gegen andere aus. Letzteres gilt für das Formieren wie auch das Betriebsladen.

Betriebsladen

Die gleiche Ladetechnik wie beim Formieren wendet man auch beim Betriebsladen an. Die schonendste Lademethode ist auf jeden Fall das Normalladen mit $I_L = 0{,}1 \cdot K_1$. In besonderen Fällen sind die Hochstromzellen auch in 3 bis 4 Stunden mit $I_L = (0{,}3 \ldots 0{,}25) \cdot K_1$ beschleunigt ladefähig. Mit Rücksicht auf die ohnehin kurze Lebensdauer sollte man das beschleunigte Laden nur auf notwendige Fälle beschränken.

Das Normalladen und auch das beschleunigte Laden können nach W-Kennlinie oder mit Konstantstrom, auf jeden Fall aber spannungsbegrenzt, durchgeführt werden. Der deutliche Spannungsanstieg zum Ladeende erleichtert ähnlich wie beim Blei-Akkumulator die Anwendung automatisch abschaltender Ladegeräte. Das für den Amateur wohl am einfachsten und sicher auch preiswert zu realisierende automatische Ladeverfahren dürfte das Laden mit Vorwiderstand (W-Kennlinie) und Spannungsbegrenzung (*Schmitt*-Trigger) sein. Die Spannungsbegrenzung wird auf 2,05 V je Zelle bei +20 °C eingestellt. Der Aufbau geregelter Ladegeräte mit UI-Kennlinie erfordert vom Amateur in Anbetracht der Empfindlichkeit des Silber-Zink-Akkumulators gegen Überladen einige Erfahrungen bei Entwurf und Anwendung dieser Geräte. Den Silber-Zink-Akkumulator kann man auch ohne Abschaltautomatik laden, nur muß dann der Ladevorgang besonders bei Ladeende genau kontrolliert werden. Dafür wird vom Hersteller folgende Verfahrensweise empfohlen:

Vor dem Laden werden alle Zellen restentladen bis 1 V je Zelle. Geladen wird mit $I_L = 0{,}1 \cdot K_1$ 10 Stunden lang.

I_L ist genau einzustellen (Amperemeter der 1,5-%-Genauigkeitsklasse, messen im letzten Drittel des Anzeigebereichs). Nach 10 Stunden wird die Klemmenspannung an jeder Zelle stündlich kontrolliert. Ab $U_Z = 2{,}0$ V liest man alle 10 min ab und beendet das Laden, wenn $U_{ZLS} = 2{,}05$ V erreicht sind.

Im Vergleich zum Laden der anderen Akkumulatorarten mag das Verfahren beim Silber-Zink-Akkumulator zunächst kompliziert erscheinen. In der Praxis lassen sich die Vorschriften aber ohne Schwierigkeiten anwenden. Auf jeden Fall, und das ist bei Hochleistungsantrieben entscheidend, wird ein derartig geladener (und gewarteter) Akkumulator seine Nennleistung und auch die volle Lebensdauer erreichen.

5.5. Entladen

Nach dem Laden trennt man die Zellen (oder die Batterie) vom Ladegerät ab und stellt die Batterie in der alten Reihenfolge zusammen. Danach sollte der Akkumulator möglichst 24 Stunden ruhen, mindestens aber 12 Stunden, ehe er voll belastet wird. Die Betriebstemperatur beträgt −20 °C bis +60 °C. Die günstigste Lagertemperatur für geladene Zellen ist +20 °C. Bis zu 4 Wochen können die Zellen vollgeladen gelagert werden. Zur Lagerung selbst sind im nächsten Abschnitt weitere Hinweise aufgeführt.

Der Vorzug des Silber-Zink-Akkumulators besteht in seiner hohen Belastungsfähigkeit und der guten Spannungslage während der Entladung. Die Klemmenspannung der Zelle beträgt im Leerlauf $U_{Z0} = (1{,}82 \ldots 1{,}86)$ V und bei Belastung mit $I_E = 1 \cdot K_1$ $U_Z = 1{,}5$ V.

Das typische Verhalten des Silber-Zink-Akkumulators läßt sich gut an den Belastungskennlinien ablesen (Bild 5.3). Bereits an anderer Stelle wurde darauf verwiesen, daß sich der Innenwiderstand in Abhängigkeit vom Ladezustand ändert. Das ist an den Kennlinien ebenfalls erkennbar. Zunächst wäre der starke Einfluß des Innenwiderstands und damit der inneren Verluste auf die nutzbare Kapazität zu nennen. Zum Beispiel beträgt die nutzbare Kapazität bei $I_E = 6 \cdot K_1$ nur noch etwa 85%. Den Einfluß des Innenwiderstands erkennt man auch daran, daß die Klem-

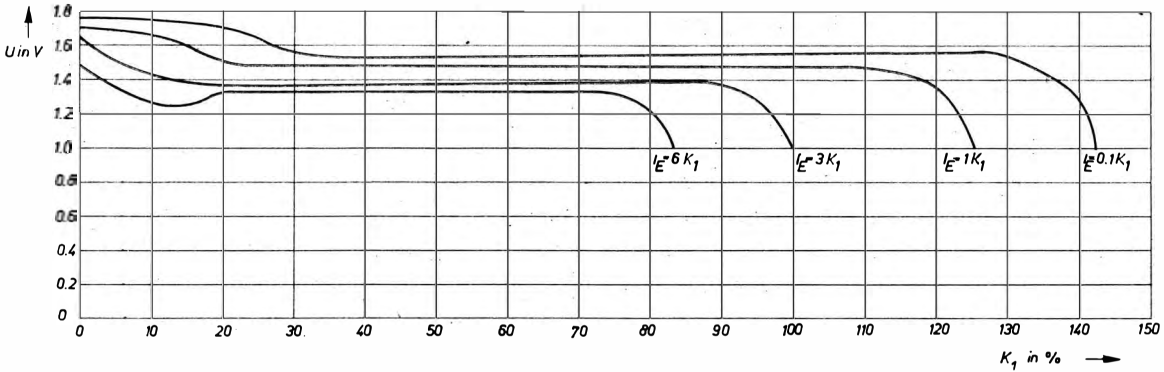


Bild 5.3 Entladekennlinie einer Silber-Zink-Zelle SZ-1,5 für verschiedene Belastungen

menspannung von $U_{Zo} = 1{,}82$ V im Leerlauf bis auf $U_Z = 1{,}3$ V bei Belastung absinkt. Bei noch stärkerer Belastung kann sie bis auf $U_Z = 1{,}1$ V zurückgehen.

Interessant ist aber auch der Kurvenbeginn. Bei geringer Belastung ($I_E = 0{,}1 \cdot K_1$) steigt der Innenwiderstand bis zu 35% der entnommenen Kapazität und bleibt dann annähernd konstant, erst zum Entladeschluß steigt er wieder stark an. Anders verhält er sich bei Hochstrombelastung. In diesem Fall steigt er zunächst, bis etwa 10% der Kapazität entnommen sind, sinkt dann wieder (Klemmenspannung steigt!) und bleibt bis zum Entladeschluß konstant. Diese Verringerung des Innenwiderstands nach kurzzeitiger starker Belastung ist auf die Erwärmung des Elektrolyten zurückzuführen, die damit eine bessere Leitfähigkeit und folglich einen geringeren Innenwiderstand bewirkt. Allerdings steigt die Klemmenspannung nie auf einen höheren Wert als bei geringeren Belastungen. Dieser Effekt ist für den Einsatz wichtig, da der Akkumulator erst nach einer Anlaufphase (Erwärmung!) seine maximale Leistung abgibt.

Das besondere Merkmal des Silber-Zink-Akkumulators ist seine Belastungsfähigkeit. Ohne Nachteil für die Lebensdauer kann er mit Strömen bis zu $I_E = 20 \cdot K_1$ belastet werden. Kurzzeitige Belastungen mit Strömen bis zu $I_E = 80 \cdot K_1$ sind möglich. Damit ist der Silber-Zink-Akkumulator praktisch kurzschlußfest. Die Entladeschlußspannung beträgt $U_{ZES} = 1$ V und sollte im Interesse der Lebensdauer auf keinen Fall unterschritten werden. Durch elektronische Hilfsmittel kann man auch entsprechende Sicherungen gegen Tiefentladen und Umpolen einzelner Zellen im Batterieverband im Modell einbauen (s. Band 3).

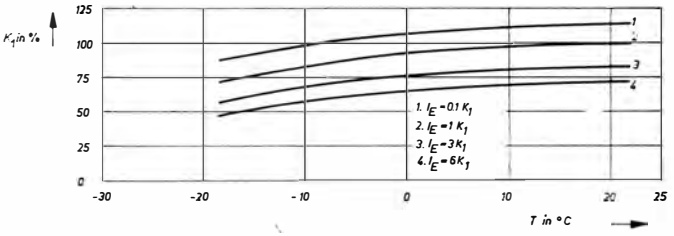


Bild 5.4 Temperaturverhalten der Kapazität einer Silber-Zink-Zelle SZ-1,5 bei Entladen mit $I_E = 0{,}1 \cdot K_1$, $I_E = 1 \cdot K_1$, $I_E = 3 \cdot K_1$, $I_E = 6 \cdot K_1$

Daß der Silber-Zink-Akkumulator, bedingt durch die temperaturabhängige Leitfähigkeit des Elektrolyten, ein ausgeprägtes Temperaturverhalten hat, war bereits aus den Belastungskennlinien (Bild 5.3) zu ersehen. Noch deutlicher wird das, wenn man die nutzbare Kapazität in Abhängigkeit von der Temperatur betrachtet (Bild 5.4). Der Silber-Zink-Akkumulator erreicht bei +20 °C seine Nennkapazität. Bei −15 °C hat er dann nur noch 75% des Nennwerts. Deutlich wird an dieser Darstellung auch, daß bei höheren Belastungsströmen die nutzbare Kapazität ebenfalls rapide abnimmt. Für den praktischen Betrieb sind aus diesen Kennlinien 2 wichtige Schlußfolgerungen abzuleiten:

1. Sollen Hochleistungen erzielt werden, so ist die Betriebstemperatur von +20 °C einzuhalten.
2. Wird der Akkumulator stärker als mit der Nennleistung belastet, dann sinkt die nutzbare Kapazität und damit die Betriebszeit erheblich.

Bezüglich dieser beiden Faktoren weist der Nickel-Kadmium-Akkumulator mit Sinterzellen ein günstigeres Verhalten auf (s. Bild 4.20).

Für die Selbstentladung des Silber-Zink-Akkumulators können keine exakten Angaben gegeben werden; sie wären bei der nur geringen Lebensdauer auch kaum von praktischem Wert. Das Selbstentladungsverhalten wird von der Qualität der aktiven Materialien, deren Technologie und der Lagerungstemperatur bestimmt. Die Selbstentladung der Zellen ist bei +20 °C gering, trotzdem empfiehlt sich 24 Stunden vor der Belastung ein Nachladen auf die volle Kapazität bzw. bis zur Ladeschlußspannung.

5.6. Anwendungstechnische Hinweise

Auf die Probleme der Ladeverfahren und -technik wurde im Abschnitt 5.4., Laden, ausführlich eingegangen. Durch den speziellen Anwendungszweck (Hochleistungsantrieb) und wegen der geringen Lebensdauer der Hochstromzellen sind das Dauerladen bzw. Erhaltungsladen zur Überbrückung der Betriebspausen überflüssig. Hinzu kommt, daß die Selbstentladungsrate gering ist. Bis zu 4 Wochen lagert man den Silber-Zink-Akkumulator vollgeladen und lädt vor dem Einsatz nach. Soll der Akkumulator länger als 4 Wochen gelagert werden, so entlädt man ihn

vorher bis zur Entladeschlußspannung von 1 V je Zelle. In dieser Form sind die Zellen bis zu 6 Monaten lagerfähig. Die Lagertemperatur der gefüllten Zelle beträgt −40 °C bis +40 °C. Die trockene Zelle kann bei Temperaturen von −60 °C bis zu 5 Jahre gelagert werden. Auch trockene Zellen erleiden einen Kapazitätsverlust in der Größenordnung von 15% je Jahr.

Die Betriebstemperatur der Silber-Zink-Zellen liegt zwischen −20 °C und +60 °C. Hohe Betriebstemperaturen beeinflussen die Haltbarkeit des Scheiders und damit die Lebensdauer nachteilig. Für die Lebensdauer von Hochstromzellen kann man von 5 bis 30 Zyklen oder von einem halben Jahr — je nach Belastung und Betriebstemperatur — ausgehen. Nach 15 Zyklen ist mit 20% Kapazitätsverlust zu rechnen. Vorschriftsmäßiges Formieren und Kontrolle des Elektrolytstands sind für die Lebensdauer ebenfalls entscheidend.

Es hat sich in der Praxis als sehr zweckmäßig erwiesen, die Zellen zu kennzeichnen und über alle Maßnahmen und gemessenen Kennwerte wie Wartung, Formieren, Laden, Entladen, Zeit, Strom und Spannung genau Protokoll zu führen. An Hand eines solchen Protokolls kann man sofort die Leistungsfähigkeit der Zellen und der ganzen Batterie einschätzen und weiß auch, wann Sondermaßnahmen (Auswechseln von Zellen o. ä.) erforderlich sind. Um Hochleistungen zu erzielen und den teuren Akkumulator optimal auszunutzen, empfiehlt sich diese zunächst etwas aufwendig erscheinende Verfahrensweise.

Die Zellen werden nur mit einer geringen Elektrolytmenge gefüllt, die zum Teil von den Platten und den Scheidern aufgesaugt wird. Die Gasentwicklung während der Belastung ist gering, so daß die Zelle auch kurzzeitig mit dem Verschluß nach unten betrieben werden kann, ohne daß Elektrolyt austritt. Das ist wichtig für die Anwendung in tragbaren Geräten, aber auch im Modell. Ein schnelles Boot schlägt bei Wellengang oder in enger Kurve doch einmal um; ausgetretene Kalilauge zerfrißt nicht nur Holz, sondern auch Polyesterschichten, von der Elektronik im Boot ganz zu schweigen. Die normale Betriebslage der Zellen ist auf jeden Fall mit dem Verschluß nach oben.

Aus Gewichtsgründen entfernen Modellbauer bei den Zellen den Deckel mit Polbolzen und Ventil. Die Zelle wird mit einem dünnen Deckel abgeschlossen, durch den die Plattenverbinder (Silberdrähte) herausgeführt werden und in dem noch eine Bohrung

zum Nachfüllen des Elektrolyten angebracht wird. Ob der erzielte Gewichtsvorteil (eventuell eine Zelle mehr) den damit verbundenen Nachteil der Gefährdung von Modell, Motor und Elektronik wettmacht, muß der Amateur letztlich selbst entscheiden. Wer allerdings schon einmal einen Bootskörper oder Empfänger gesehen hat, in dem sich Kalilauge „frei entfalten" konnte, der läßt die Zellen im Originalzustand und nutzt andere Möglichkeiten zur Leistungssteigerung seines Modells.

Werden die Zellen zu Batterien geschaltet, so ist blanker Kupferdraht ungeeignet. Die Zellenbrücken schneidet man aus Kupferdraht (möglichst 1,5 mm^2 Querschnitt), biegt die Stücke zurecht und läßt sie stark versilbern. Die Zellenoberseite (Polanschlüsse!) deckt man sicher mit einer dünnen Kunststoffkappe oder Folie ab, um unbeabsichtigte Kurzschlüsse zu vermeiden! Es ist für ausreichende Wärmeableitung und Belüftung der Zellen im Modell zu sorgen, denn übermäßig erwärmte Zellengefäße verformen sich. Da die Zellengefäße und -deckel aus Kunststoff bestehen (einige Zellendeckeltypen sind zusätzlich vergossen, um diese zu schützen), müssen die Polmuttern mit Gefühl, aber fest (geringer Übergangswiderstand!) angezogen werden.

6. Literatur- und Quellenverzeichnis

[1] *Autorenkollektiv:* Der Nickel-Kadmium-Akkumulator; General-Electric, Rüsselsheim 1975

[2] Firmendruck: dryfit PC-Batterien, dryfit ST-Batterien; Ladetechnik, Spezialakkumulatoren; Sonnenschein GmbH, Büdingen 1976

[3] Firmendruck: Gasdichte, wiederaufladbare Nickel-Kadmium-Akkumulatoren; VARTA Batterie AG, Hannover 1975

[4] Firmendruck: Silber-Zink-Leichtakkumulatoren; Silberkraft, Duisburg 1974

[5] Firmendruck: Technische Information über die Kleinstakkumulatoren 2 V — 0,5 Ah und 2 V — 0,3 Ah; VEB Elektrotechnische Fabrik, Sonneberg 1973

[6] Firmendruck: Wiederladbare gasdichte Nickel-Kadmium-Akkumulatoren der Serie VR; SAFT, Paris 1975

[7] Firmenprospekt: „ETERNACELL", Silberkraft, Duisburg 1974

[8] Firmenprospekt: „Gasdichte Nickel-Kadmium-Akkumulatoren" des VEB Grubenlampenwerke Zwickau, 1976

[9] Firmenprospekt: „Nickel-Kadmium-Akkumulatoren" des VEB Grubenlampenwerke Zwickau, 1977

[10] Firmenprospekt: „Primärelemente" des VEB Kombinat Galvanische Elemente, Werk Berlin

[11] Firmenprospekt: Wartungsfreie Bleiakkumulatoren; VARTA Batterie AG, Hannover 1976

[12] *Franz, D.:* Chemische Stromquellen; Reihe „Der praktische Funkamateur", Bd. 79; Deutscher Militärverlag, Berlin 1968

[13] *Garten, W.:* Bleiakkumulatoren; VDI-Verlag, Düsseldorf 1969

[14] *Häusler, E., K. Jeworrek:* Silber-Zink-Akkumulatoren; „etz", Bd. 27 (1975), H. 5, S. 99 bis 101

[15] *Huber, R.:* Trockenbatterien; VDI-Verlag, Düsseldorf 1968

[16] *Kinzelbach, R.:* Stahlakkumulatoren; VDI-Verlag, Düsseldorf 1968

[17] *Sturm, F. v.:* Elektro-chemische Stromerzeugung; Verlag Chemie, Weinheim/Bergstraße 1969